

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

LIBEREC 2007

ŠÁRKA UHROVÁ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ

Obor 31-12-8

Zaměření : Textilní materiálové inženýrství

Katedra textilních materiálů

TERMOMECHANIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S ČEDIČOVOU VÝZTUŽÍ

THERMOMECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS WITH BASALT STIFFENER

KTM – 458

Šárka Uhrová

Vedoucí diplomové práce : Ing. Vladimír Kovačič

Rozsah práce :

Počet stran : 58

Počet obrázků : 25

Počet tabulek : 23

Počet grafů : 66

Počet příloh : 8

Leden 2007

ANOTACE

Termomechanika kompozitních materiálů s čedičovou výztuží

Tato diplomová práce se zabývá studiem termomechanických vlastností kompozitních materiálů s čedičovou výztuží. Výztuží kompozitu jsou jednosměrně uspořádána čedičová vlákna s obchodním názvem Sudaglas a matrici tvoří polysilixanová pryskyřice s obchodním názvem Lukosil M 130. Pro měření byl použit termomechanický analyzátor TMA CX03R.

Teoretická část obsahuje poznatky o struktuře, vlastnostech, výrobě a použití čedičových vláken a poznatky o teplotních změnách kompozitních materiálů.

V experimentální části byl zjišťován koeficient teplotní roztažnosti a rozměrová změna vzorku. Pro doplnění poznatku experimentu bylo využito elektronové rastrovací mikroskopie.

Výsledky měření jsou přehledně uvedeny v jednotlivých grafech, tabulkách, přílohách a jsou statisticky zpracovány. V závěrečné části práce je hledaná příčina rozdílné teplotní roztažnosti kompozitů.

ANNOTATION

Thermomechanics of composite materials with basalt stiffener

The diploma thesis deals with study of thermomechanical characteristics of composite materials with basalt stiffener. The stiffener of the composite is formed by one way adjusted basalt fibres known under the trade name Sudaglas and by the matrix formed by polysilixan resin known under the trade name Lukosil M 130. A thermomechanical analyzer TMA CX03R was used for measuring.

A theoretical part contains information on a structure, characteristics, production and use of basalt fibres and information on thermal changes of composite materials.

A thermal expansivity coefficient and sample's size change was investigated in an experimental part of the thesis. To supplement the information gained from the experiment, the electronic raster microscopy was used.

The results of the measuring are organized and statistically processed in single graphs, tables and attachments. The final part of the thesis deals with cause of different thermal expansivity of composites.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_{\max} [%]	- maximální tažnost
A [g]	- hmotnost pevné látky na vzduchu
a [g]	- hmotnost pevné látky před pyrolýzou
B [g]	- hmotnost pevné látky v destilované vodě
b [g]	- hmotnost pevné látky po pyrolýze
C [g]	- rozdíl hmotnosti pevné látky po vysušení
c [g]	- rozdíl hmotnosti pevné látky po vysušení
α_p [°C]	- součinitel teplotní roztažnosti v podélném směru
α_v [°C]	- součinitel teplotní roztažnosti vzpěr
d [μm]	- průměr vlákna
E [Mpa]	- Youngův modul pružnosti v tahu
ε [l]	- deformace
F [N.tex ⁻¹]	- poměrná pevnost
F [N]	- tahová síla
l [mm]	- naměřená výška vzorku
L_0 [mm]	- původní výška vzorku
m [g]	- hmotnost
ρ [kg.m ⁻³]	- měrná hmotnost
s	- směrodatná odchylka
s^2	- rozptyl
σ [N]	- napětí
T [°C]	- teplota
T [tex]	- jemnost
TMA	- Termomechanická analýza
v [%]	- variační koeficient
W [um.J ⁻¹]	- energie
\bar{x}	- průměr naměřených hodnot

OBSAH

TEORETICKÁ ČÁST	10
1. ÚVOD	10
2. ČEDIČOVÁ VLÁKNA	11
2.1. Rozdělení anorganických vláken	11
2.2. Vývoj čedičových vláken	12
2.2.1. Nekonečná čedičová vlákna	13
2.3. Struktura taveného čediče	14
2.4. Chemické složení čedičového vlákna	17
2.5. Vlastnosti čedičových vláken	18
2.5.1. Všeobecné vlastnosti čedičových vláken	18
2.5.2. Vlastnosti fyzikální, chemické a mechanické	19
2.5.3. Ekologické přednosti čedičových vláken	20
2.6. Výroba anorganických vláken	21
2.6.1. Výroba čedičových vláken	21
2.6.2. Výroba nekonečných čedičových vláken	22
2.7. Použití čedičových vláken	23
3. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	25
3.1. Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů	25
3.1.1. Rozdělení mechanických vlastností	26
3.2. Typy deformačního chování vláken	26
3.3. Termomechanické a tepelné vlastnosti	26
3.3.1. Teplota tání a zesklnění	27
3.4. Silikátové pryskyřice	27
3.4.1. Metylsilikonové pryskyřice – Lukosil M 130.....	27
3.4.2. Metylfenylsilikonové pryskyřice	28
3.4.3. Lukosil 901.....	28
3.5. Postup výroby kompozitů s čedičovými vlákna	29
3.6. Použití kompozitních materiálů	30
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	31
4. METODA MĚŘENÍ TEPLOTNÍ ROZTAŽNOSTI	31
4.1. Experimentální materiál	31
4.2. Formulace problému	31
4.3. Teoretická analýza problému	32
4.4. Teplotní roztažnost	33

	4.5. Termomechanický analyzátor TMA CX03R	34
5.	NÁVRH EXPERIMENTU	37
	5.1. Popis experimentu	37
	5.2. Přesná pila IsoMet 100	38
	5.3. Princip rastrovacího elektronového mikroskopu VEGA	39
	5.4. Stanovení koeficientu teplotní roztažnosti	40
	5.5. Rozdělení experimentu	40
6.	VÝSLEDKY MĚŘENÍ A JEJICH DISKUZE	41
	6.1. Stanovení koeficientu teplotní roztažnosti	41
	6.2. Rozměrová změna vzorku – ohřev a chlazení	42
7.	ZJIŠŤOVÁNÍ PARAMETRŮ ČEDIČOVÝCH VLÁKEN	44
	7.1. Stanovení hustoty čedičového rovingu	44
	7.1.1. Stanovení hustoty rovingu vážením	45
	7.1.2. Stanovení hustoty rovingu vážením – před pyrolýzou	46
	7.1.3. Stanovení hustoty rovingu vážením – po pyrolýze s odstupem 24 hodin	47
	7.2. Stanovení jemnosti vláken	49
	7.2.1. Měření na Vybroskopu 400	49
	7.3. Stanovení průměru vlákna	50
	7.3.1. Měření pomocí světelného mikroskopu	50
	7.3.2. Měření pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu	52
	7.4. Statistické zpracování dat	53
	7.4.1. Výsledky naměřených hodnot a přepočty	53
	7.4.2. Grafy porovnání naměřených hodnot	54
	7.5. Stanovení pevnosti vlákna tahovou zkouškou	55
8.	ZÁVĚR	56
9.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58

2 ČEDIČOVÁ VLÁKNA

2.1 Rozdělení anorganických vláken

Anorganická vlákna se rozdělují a charakterizují řadou kritérií a vlastností. Mezi základní patří dělení podle původu, podle výchozího materiálu, z něhož bylo vlákno vyrobeno. Rozlišujeme vlákna přírodní a chemická. Anorganická vlákna spadají do skupiny vysoce výkonných vláken, které jsou tříděny do skupin:

- vysoce pevná vlákna
- vlákna s vysokým modulem
- vlákna s vysokou tepelnou odolností

Vysoce pevná vlákna se vyznačují extrémně vysokou pevností. Mají vysoký počáteční modul E , poměrně nízkou odolnost vůči zvýšeným teplotám (většinou jsou nehořlavá), odolávají působení chemikálií, oxidaci a další výjimečné vlastnosti (nízkou tažnost, poměrně nízkou odolnost vůči stlačování a ohybu). Do této skupiny patří vlákna keramická, uhlíková, paraamidová (Kevlar), skleněná, monokrystaly (Whiskers) a kovová. Používají se do ochranných oděvů, kompozitních struktur a do technických textilií.

Vlákna s vysokým modulem jsou charakterizována svými vysokými moduly pružnosti. Poměrně jednoduše lze tedy odhadnout maximální modul při využití znalosti o vazbách ve vláknech. Z hlediska anizotropie modulů se vlákna dělí do dvou skupin:

- sklo a keramická vlákna (prakticky izotropní)
- uhlíková a organická vlákna (silně anizotropní).

Vlákna s vysokou tepelnou odolností jsou vystavována extrémně vysokým teplotám (250 – 2000°C). Tepelnou odolnost posuzujeme podle maximální tepelné expozice, ale také podle doby působení. To vedlo k výzkumu vláken, která odolávají pyrolýze do cca 400°C. Nad touto teplotou některým vláknům zuhelnatí struktura, ale stále mají dostatečné mechanické vlastnosti pro alespoň krátkodobé použití. Do této skupiny patří vlákna z karbidu křemíku, vlákna z bóru, vlákna z uhlíku, vlákna keramiky a bórnitridu [7].

2.2 Vývoj čedičových vláken

Nejstarším horninovým vláknem je vlákno sopečné. Některé sopky vyvrhují lávu, která má takové složení a viskozitu, že je za větrných podmínek roztrhávána na vlákna, která se nazývají horninová vata. Chemické složení těchto vláken je podobné jako u vláken čedičových.

Čediče jsou třetihorního a čtvrtohorního stáří a tvoří v přírodě lávové proudy, příkrovy, mohou však tvořit i žíly. Vznikly ztuhnutím grantového magmatu na zemském povrchu (tzv. plateauzalty) a nebo v podobě žil vyplnily trhliny v zemské kůře. Při rychlém tuhnutí a ochlazování okrajových částí čediče mohou místy vzniknout i čedičová sopečná skla. Vznikají také čedičové sloupy (obr.1). Jde o přirozenou odlučnost čediče podle puklin vzniklých při chladnutí a tuhnutí magmatu. Magma tuhne velmi rychle na povrchu a odlučné trhliny probíhají kolmo k ploše čedičového tělesa [20].



Obr. 1 Sloupovitá odlučnost čediče

Průmyslové zpracování vyvřelých hornin je usnadněno teplotou v metalurgii, kde má tavenina dostatečnou tekutost a dá se zpracovat na vlákno. V průmyslově vyspělých státech vzrostla výroba horninových vláken. Později se o tato vlákna začal zajímat i náš průmysl. Výroba i spotřeba začala rychle stoupat. Výroba čedičových vláken v naší republice začala od r. 1952. Jako suroviny byly používány čediče jakýchkoliv přísad [6]. Vlákna byla vyráběna ve formě čedičové vaty metodami rozfukování nebo odstředivým způsobem.

2.2.1 Nekonečná čedičová vlákna

V minulosti se vyráběla čedičová vlákna ve formě krátkých vláken. V současné době se vlákna vyskytují i ve formě hedvábí.

Jedná se o nový typ technického vlákna. Tento typ vlákna poskytuje nové možnosti zvýšení užitných vlastností mnoha technických výrobků. S růstem nároků na nové textilní technické výrobky, se zvýšenými požadavky na tepelnou a chemickou odolnost, se může uplatnit tento nový typ technického vlákna s vynikajícími vlastnostmi a s přijatelnou cenou.

Čedičová vlákna jsou složena ze svazku nekonečně dlouhých fibril vzniklých zvlákněním taveniny anorganického minerálu čediče – bazaltu vhodného složení. Jsou vysoce pevná, při dostatečně malém průměru vláken ohebná a využitelná na výrobu technických výrobků ve všech odvětvích průmyslu.

Nekonečná čedičová vlákna ve formě technického hedvábí naleznou hlavní uplatnění v textilním zpracování na nitě – roving (obr.2), čedičové nitě skané, družené a kordy. Tato čedičová příze se dále dá zpracovávat na plošné a délkové textilní technické útvary – provazce, hadice a popruhy a prostorové textilní technické úpravy. Firma Basaltex se zaměřuje na zpracování nekonečných čedičových vláken především do plošných a délkových textilií [18].



Obr. 2: Roving, nitě

2.3 Struktura taveného čediče

Společným znakem všech čedičů jsou typy živců (plagioklas, anorthit), bezvodé podvojně křemičitany hlinité, které obsahují oxid sodný, draselný a vápenatý, který se vyskytuje v jejich struktuře [6].

Základní hmota čediče je složena z magnetitu (10% hmoty), augitu (50% hmoty), plagioklas (30% hmoty) a dalších minerálních fází (10% hmoty). V jemnější základní hmotě se vyskytují vyrostlice a velké krystaly magnetitu různé velikosti [10].

- **Magnetit** – nerost, směs železa a oxidu železitého. Chemicky jej lze popsat vzorcem FeFe_2O_4 . Je šedočerný až černý, polokovově až kovově lesklý, neštěpný, má černý vryp, vysokou hustotu a magnetismus. Vzniká magmaticky, v některých typech přeměněných hornin. Používá se jako nejkvalitnější, železná ruda. Výskyt Krušné hory, Vlastějovice u Ledče nad Sázavou, Švédsko, Rusko, USA.



Obr.3: Magnetit

- **Augit** – nerost, složitý silikát vápníku, hořčíku, železa, sodíku a hliníku. Chemicky jej lze popsat vzorcem $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe}^{2+})(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$. Je černý, hnědočerný, hnědozelený, skelně lesklý, neprůhledný a dobře štěpný ve dvou směrech, které svírají úhel přibližně 90° . Vzniká z magmat chudých křemíkem (gabra, čedič). Jako vysokoteplotní minerál se v normálních podmínkách často přeměňuje na amfibol či chlorit. Augit nemá praktické využití, patří mezi důležitý horninotvorný minerál. Výskyt Bořislav u Teplic, Vlčí hora u Černošce.



Obr.4: Augit

- **Plagioklas** – trojklonný sodnovápenatý živec. Složený ze směsi proměnlivých podílů hlinitokřemičitanů sodíku $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (albit) a vápníku $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (anortit). Plagioklas je bělavý, žlutý, červenavý, zelenomodrý až šedý. Vzniká krystalizací z magmatu, přeměnou z jiných minerálů. Další vlastností je dokonalá štěpnost. Používá se jako dekorační a ozdobný kámen, keramika. Výskyt Dolní Bory, Švýcarsko.



Obr. 5: Plagioklas

- **Anorthit** – trojklonný křemičitan vápenatý. Složený ze směsi draslíku, železa, hořčíku a hliníku. Chemicky jej lze popsat vzorcem $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. Barvy bílé, šedé, žluté, vzácně bezbarvý, je skelně lesklý, dokonale štěpný. Vzniká jako kontaktní minerál na stylu mramorů a efuziv. Nemá praktické využití, je to

důležitý horninotvorný minerál. Vyskytuje se v některých noritech, gabrech, troktolitech, andezitech. Někdy vzniká jako kontaktní minerál na stylu mramorů a efuziv.



Obr. 6: Anorthit

- **Olivín** – křemičitan s proměnlivým podílem hořčíku a železa. Chemicky jej lze popsat vzorcem $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$. Je zelený, žlutozelený až olivově zelený, méně často černý, hnědý, bezbarvý, skelně lesklý, průsvitný, jen nezřetelně štěpný, má bílý vryp. Vzniká krystalizací z magmat s nízkým obsahem křemíku (olivínovce, čediče). Používá se ve slévárenství (cihly, vyzdívky pecí, formy pro odlévání), při výrobě bloků pro uchování tepla ve sklářských pecích, dále v chemickém průmyslu, při výrobě hnojiv, jako brusivo. Drahokamové odrůdy se používají jako šperkový kámen (tzv. chyzolit). Výskyt Kozákov – Smrčí, v mnoha čedičích Českého středohoří, Norsko, Egypt, Brazílie, Pakistán, Nový Zéland [21], [22], [23] a [24].



Obr. 7: Olivín

2.4 Chemické složení čedičového vlákna

Čedičové horniny vhodné pro výrobu vláken, obsahují obvykle dva základní minerály a to olivín ($2(\text{MgFe}) \text{O SiO}_2$) a nefelin ($\text{Na}_2\text{O Al}_2\text{O}_3 2\text{SiO}_2$) [19]. Všechny vyvřelé horniny mají podobné chemické složení. Liší se procentuálním zastoupením jednotlivých složek [18].

V tab.1. je porovnání chemického složení čedičových vláken a E-skleněných vláken.

Tab. 1: Chemické složení čedičových vláken a E-skleněných vláken

Chemické složení čedičových vláken a E-skleněných vláken		
Chemické složení	Čedičové vlákno (hmotnostní %)	E-skleněné vlákno (hmotnostní %)
SiO_2	57,5	55
Al_2O_3	16,9	15
Fe_2O_3	9,5	0,3
CaO	7,8	18
MgO	3,7	3
Na_2O	2,5	0,8
TiO_2	1,1	-
K_2O	0,8	0,2
B_2O_3	-	7
F	-	0,3

- *Oxid křemičitý (SiO_2):* zvyšuje hodnotu tavicí teploty a viskozitu taveniny.
- *Oxid hlinitý (Al_2O_3):* zvyšuje hodnotu teploty tavení a viskozitu taveniny.
- *Oxid vápenatý (CaO):* snižuje viskozitu taveniny, zvyšuje tavicí teplotu.
- *Oxid hořečnatý (MgO):* působí ještě intenzivněji než oxid vápenatý.
- *Oxid železnatý (FeO):* snižuje teplotu tavení a viskozitu taveniny.
- *Oxid titaničitý (TiO_2):* má podobné vlastnosti jako oxid železnatý.

Přítomnost oxidů ovlivňuje vlastnosti taveniny a vlastnosti vláken z něj vyrobených [5].

2.5 Vlastnosti čedičových vláken

2.5.1 Všeobecné vlastnosti čedičových vláken

Barva čediče se mění podle obsahu oxidů železa. Vlákná jsou hnědá, hnědošedá, hnědozelená. Povrch vláken je téměř vždy hladký s plným kruhovitým průřezem. Struktura čedičových vláken je sklovitá. Vlákná, u kterých nastala jen nepatrná krystalizace se vyznačují vysokou křehkostí. Důsledkem tohoto jevu je snadné zlomení vláken.

Průměr vlákna významně ovlivňuje všechny fyzikální i chemické vlastnosti. Fyzikální vlastnosti ovlivňují pevnost v tahu, křehkost, objemovou hmotnost také tepelnou odolnost a tepelně izolační vlastnosti i zvukově izolační vlastnosti.

Poměrná pevnost v tahu se mění v závislosti na některých veličinách. Roste se zmenšujícím se průměrem. Ke snížení pevnosti dochází při vysokých teplotách a v kyselém prostředí. Křehkost klesá s rostoucí pevností. K přetrhu vlákna dochází bez příčné kontrakce. Čedičová vlákna mají objemovou hmotnost 2600 - 2800 kg/m³. Objemová hmotnost ovlivňuje délku vláken, jejich pružnost a tažnost.

Tepelná odolnost je vysoká, ale po překročení teploty nad 700°C se výrazně mění měrné vlastnosti vláken. Čedičová vlákna jsou také výborným izolačním materiálem. Jejich vlastnosti po stránce zvukově izolační jsou také výborné. Je to dané vláknitou strukturou a vysokou pórovitostí.

Chemické a biologické vlastnosti jsou hodnoceny jako dobré. Čedičová vlákna odolávají vlhkosti, studené a teplé vodě. Jsou dobře odolná i vůči hydroxidům. Jejich odolnosti vůči silně koncentrovaným hydroxidům je dokonce několikanásobně větší, než u skleněných vláken. Oproti tomu kyselinám je tato odolnost menší. Vlákná nejsou hygroskopická a mají stálý objem. Nejsou napadána mikroorganismy [4].

Hlavní charakteristika materiálu

- velký tepelný rozsah použitelnosti
- nehořlavost
- minimální nasákavost
- dobrá chemická odolnost proti:
 - vodě
 - většině alkáliím
 - organickým kyselinám

- anorganickým kyselinám
- organickým rozpouštědlům
- většině chemikálií
- a jiným agresivním látkám

- nízká tepelná vodivost
- vysoký koeficient zvukové pohltivosti
- vysoký elektrický odpor
- dobrá tepelná odolnost
- odolnost proti eroznímu prostředí
- dobrá odolnost proti UV záření
- dobrá odolnost proti plísním a jiným mikroorganismům [18]

2.5.2 Vlastnosti fyzikální, chemické a mechanické

Fyzikální vlastnosti jsou např. hustota, navlhavost, pevnost v tahu, modul pružnosti v tahu, změna pevnosti atd.

Chemické vlastnosti jsou definovány stupněm odolnosti vláken vůči chemickému působení.

Mechanické vlastnosti popisují schopnost materiálu měnit tvar, tzv. deformovat se v důsledku působení vnějších mechanických sil. Mechanické vlastnosti jsou odezvy materiálu na mechanické působení. Hlavní způsoby namáhání na: tah, tlak, krut a ohyb .

Tab.2: Porovnání fyzikálních vlastností čedičových vláken a E- skleněných vláken

Porovnání fyzikálních vlastností čedičových vláken a E-skleněných vláken		
Fyzikální vlastnosti	Čedič	E-sklo
Hustota (při 20 °C) [kg/m ³]	2 900	2 600
Navlhavost [%]	0,5	1
Modul pružnosti v tahu [MPa]	100 000	70 000
Pevnost v tahu [MPa]	1 850 až 2 150	1 850 až 2 150
Pevnost v tlaku [MPa]	300	300
Změna pevnosti v tahu při relativní vlhkosti 100% za 64 dny - [%]	91	72
Změna pevnosti v tahu při teplotě 400 °C - [%]	82	52

Tab.3: Porovnání chemických vlastností čedičových vláken a E- skleněných vláken

Porovnání chemických vlastností čedičových vláken a E-skleněných vláken		
Chemické vlastnosti	Čedič	E-sklo
Úbytek hmotnosti při 100 °C za 3 hod. v H ₂ O - [%]	99,8	99,3
Úbytek hmotnosti při 100 °C za 3 hod. v 2N HCl - [%]	81,8	53,9

Tab.4: Porovnání tepelných vlastností čedičových vláken a E- skleněných vláken

Porovnání tepelných vlastností čedičových vláken a E-skleněných vláken		
Tepelné vlastnosti	Čedič	E-sklo
Pracovní teplota [°C]	-260 až 700	-60 až 460
Měrná tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,027 až 0,033	0,029 až 0,035

Elektrické vlastnosti čedičových vláken

- specifický odpor – 10¹² Ω [18].

2.5.3 Ekologické přednosti čedičových vláken

Čedičová vlákna plnohodnotně nahrazují azbestová a skleněná vlákna v různých průmyslových aplikacích. Přírodní materiál je zpracováván bez dalších přísad. Nerost se vyskytuje ve formě vhodné k zvlákňování. Celková výroba je energeticky méně náročná než výroba skelných vláken. Má menší zátěž pro životní prostředí při výrobě a likvidaci [18].

Podle dosavadních znalostí vědy, čedičový materiál je při běžném styku zdravotně nezávadný. Materiál je chemicky stálý a je určený pro technické použití. Ze základního materiálu se samovolně neuvolňují žádné škodlivé látky. Při jejich likvidaci není potřeba žádná zvláštní opatření a je možno bez rizika skladovat.

2.6 Výroba anorganických nekonečných vláken

Anorganická vlákna lze vyrobit podobnými technologiemi. Každé anorganické vlákno má však své speciální vlastnosti a těm musí být přizpůsobena výrobní technologie.

Technologický postup výroby:

- příprava taveniny (má tři fáze: tavení, homogenizace, chlazení)
- zvlákňování vláken (tužení a formování)
- lubrikace (apretace) povrchu vláken
- navíjení.

Tavení probíhá v tavící peci. Vytvářená tavenina prochází zvlákňovacími tryskami, za kterými je na vlákna nanášena lubrikace pomocí nanášecího zařízení. Tloušťka vrstvy lubrikace je řádově 0,1 μm .

Lubrikace jsou sloučeniny silikonového typu, které jsou vázány na povrch vláken. Část lubrikace je vázána chemicky, část fyzikálně. Hlavní funkcí lubrikace je ochrana vláken před vzájemným zachycováním při tvorbě rovingu na zhušťovači vláken, přizpůsobuje je k dalšímu technologickému zpracování (zakrucování, tkaní ...). Dále chrání vlákna vůči vlhkosti a zlepšení třecích vlastností umožňujících jejich textilní zpracování. Vlákna jsou navíjena na cívku [10].

2.6.1 Výroba čedičových vláken

Čedičová vlákna lze vyrábět podobnými výrobními způsoby jako vlákna skleněná. Zpracovávání hornin má však určité specifické vlastnosti a proto se přizpůsobuje výrobní technologie. Jednou z nejpodstatnějších vlastností tavených hornin je jejich poměrně krátkost, tj. krátký interval jejich zpracovatelnosti.

Čedičová vlákna se už dneska mohou běžně vyrábět mechanickým vytahováním v nekonečných délkách. Krátká vlákna se vyrábějí odstředivým a pneumatickým způsobem nebo kombinací těchto metod [5].

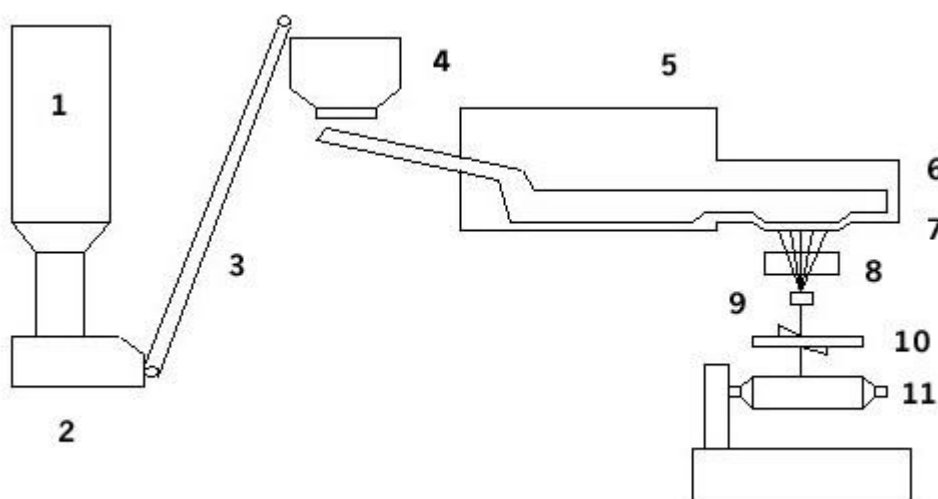
Pro výrobu vláken se používají kyselé horniny pro svůj vysoký obsah SiO_2 .

Výroba základních provedení nekonečných čedičových vláken

- průměr fibril – 9 až 13 μm
- základní jemnost nitě – 80, 160, ..., 2500, ... tex
- průměrná pevnost – 0,512 N/tex
- obsah lubrikace – 1 až 1,5%
- obsah spalitelných látek – 0,69%
- obsah vlhkosti – 0,061%
- hmotnost vlákna na cívce – 3 až 5 kg
- počet zákrutů – 0 zákrutů/m [18].

2.6.2 Výroba nekonečných čedičových vláken

V dávkovém zásobníku je surový čedič, který se odváží a správně dávkuje. Pomocí dopravníku se dopraví do dávkovače z kterého jde do tavicí pece. Roztavená surovina se z předpecí dostává do pouzdra kde se začíná formovat na jednotlivá vlákna s určeným průměrem. Dále se čedičová vlákna spojují v pramen (roving), pak následuje družení a nakonec se pramen navíjí.



Obr.8: Schématické znázornění výroby čedičových vláken

Popis obrázku:

- 1 - dávkový zásobník: surovina
- 2 - vážení, dávkování a směšování
- 3 - dopravník
- 4 - dávkovač
- 5 - tavná pec
- 6 - předpecí
- 7 - pouzdro: formování vlákna
- 8 - změna velikosti aplikace
- 9 - formování pramene (rovingu)
- 10 - pojiždění
- 11 - automatizované vinutí

2.7 Použití čedičových vláken

Čedičová vlákna se používají v izolační technice, tam kde je izolace namáhána tepně a chemicky. Jako tepelná izolace do 700°C i tehdy, pokud je izolace vystavená působení vody, žíravinám nebo chemicky agresivnímu prostředí.

Čedičová vata snáší i velmi nízké teploty až -200°C a proto se používá pro zařízení na zkapalňování plynu, na výrobu rohožek, matrací, desek, plsti, zpracování výrobků pro velmi horké provozy, např. filtrů pro horká média [4].

S využitím čedičových nekonečných vláken a čedičových textilií z nich zhotovených je možno počítat ve všech oblastech, kde se běžně dosud používají skleněná a používala azbestová vlákna.

Vlákna čedičová předčí svými fyzikálními, chemickými a mechanickými vlastnostmi vlákna skleněná i azbestová, je to základní předpoklad k jejich masivnímu rozšíření v technické praxi.

Dalšími přednostmi jsou nezanedbatelné ekologické a zdravotní výhody proti obdobným vláknům. Především menší zátěž pro životní prostředí při výrobě a likvidaci a menší zdravotní riziko při zpracování a používání [18].

Další využití čedičových vláken:

- plná náhrada skleněných vláken při výrobě tkaniny v perlinkové vazbě pro stavebnictví (omítkové systémy, zalévací hmoty ...)
- geotextilie, armovací tkaniny a vlákna (silniční a železniční stavitelství, živičné povrchy vozovek, lepenky, betonových výrobků ...)
- tepelně-izolační směsi ve stavebnictví pro žáruvzdorné stavební hmoty, plniva do tmelů apod.
- výztužné tkaniny v kompozitech a sekaná vlákna v plastických hmotách, v různých technických výrobcích (rozbrušovací kotouče, lamináty, brzdové destičky ...)
- izolace tepelné, zvukové a chemické (stavebnictví, letecký průmysl, elektrárny, automobily ...)
- filtrování agresivních látek, tkaniny a ucpávkové šňůry v chemickém průmyslu (náhrada azbestových výrobků), horkovzdušná filtrace
- ochranné žáruvzdorné a kyselinovzdorné pracovní oděvy do provozů s velkou tepelnou zátěží a s agresivním chemickým prostředím (tkaniny s hliníkovou fólií v hutích, ocelárnách, pro hasiče a svářeče, v chemických provozech, galvanovnách ...)
- bytové a interiérové nehořlavé textilie (tapety, podkladové textilie ...) [18].

3 KOMPOZITNÍ MATERIÁL

Kompozitní materiál je složen alespoň ze dvou komponent velmi odlišných vlastností. Jejichž kombinace může zajistit vlastnosti, které nemá žádný tradiční materiál. Kompozitní materiály se rozdělují podle vlastností té komponenty, které je větší podíl. Druhá komponenta tvoří výztuhu. Podle tvaru výztuhy mohou být kompozitní materiály zpevněné vlákny nebo částicemi. Kompozity s čedičovou výztuží jsou izotropní [1].

Kompozitní materiály jsou materiály složené, tj. vzniklé složením materiálů jednodušších. V základní hmotě je určitý podíl výztužných částí. Takovým klasickým materiálem je např. sklolaminát, kde základní hmotou je epoxidová pryskyřice vyztužená skleněnými vlákny (tkaninou). Výrobky z laminátu jsou lehké, pružně pevné (ve směru vláken). Laminát tak začal konkurovat dřevu (nábytek), oceli (stroje a přístroje), sportovnímu náčiní (oštěpy, tyče pro skok o tyči) a atd. [25].

Použití vláken v kompozitech

- zvyšuje tuhost (modul)
- snižuje deformabilitu vlivem tepelného působení (omezení tepelné roztažnosti)
- zvyšuje pevnost
- redukuje hmotnost výrobků [7].

Zlepšení pevnosti kompozitu

- zvýšení pevností vláken
- použití jemnějších vláken
- použití delších vláken
- zvýšení adheze (smykového modulu)
- lepší uspořádání a zaplnění [7].

3.1 Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů

Mechanické vlastnosti popisují schopnost těles změnit tvar či objem působením různých druhů vnějších mechanických sil. Vnější síly vyvolávají v tělese, tedy i ve vlákne, napětí a to mění svůj tvar – deformují se. Mechanické vlastnosti jsou významně ovlivněny strukturou vláken, dobou namáhání a teplotou, za které je zjišťujeme. [9]

3.1.1 Rozdělení mechanických vlastností

Vzhledem k různorodosti způsobů namáhání a složitosti chování látek se mechanické vlastnosti třídí podle různých hledisek. Podle účinku vnějších sil se dělí mechanické vlastnosti na deformační (elastické, viskoelastické, plastické) a destrukční (např. pevnost, odolnost v oděru). Deformační vlastnosti popisují průběh deformace materiálu. Destrukční vlastnosti zaznamenávají mechanické porušení materiálu. Podle časového režimu namáhání se vlastnosti rozdělují na statické a dynamické [3].

Dále materiál může být namáhán jednoosově (tah, tlak) nebo víceosově (krut, ohyb). S ohledem na opakování nerozlišuje namáhání prosté a cyklické a s ohledem na čas jde o statické, časově závislé (relaxace, creep) a dynamické namáhání [8].

3.2 Typy deformačního chování vláken

U vláken v pevném stavu lze nalézt v závislosti na velikosti deformačního podnětu, teplotě a vlhkosti tyto tři typy deformačních jevů:

- elastické
- viskoelastické
- plastické

Elastická deformace je okamžitá, časově nezávislá a dokonale vratná. Deformují se valenční úhly a meziatomové vzdálenosti.

Viskoelastická deformace je časově zpožděná za podnětem. V průběhu doby zatížení narůstá, po odlehčení postupně, v závislosti na čase, mizí. V principu je vratná.

Plastická deformace je časově závislá a dokonale nevratná. Způsobují ji nevratné prokluzu segmentů makromolekul [9].

3.3 Termomechanické a tepelné vlastnosti

Termomechanika je nauka o teple. Princip je založen na měření změny délky studovaného vzorku v závislosti na teplotě, času a zadané síle. Mezi termomechanické vlastnosti patří bod tání, zesklenní, přechodové teploty, ztrátový úhel, ztrátový modul, atd.

Tepelné vlastnosti jsou velice důležité, neboť jsou rozhodující pro volbu vhodných parametrů zpracování i použití. Záleží na chemickém složení vláken a jejich nadmolekulární struktuře.

3.3.1 Teplota tání a zesklenní

Některé vlastnosti se při určitých teplotách náhle mění. Teploty náhlých změn vlastností (tepelné přechody) jsou pro jednotlivé druhy vláken specifické a spojené se změnou segmentují pohyblivosti makromolekulárních řetězců. Ve většině případů jsou pozorovány fázové přechody I. a II. druhu.

Fázový přechod I. druhu je charakterizován změnou stavu (plynu, kapalina, pevná látka). Např. při tání probíhá změna z pravidelného uspořádání krystalů na neuspořádanou formu taveniny. Tento přechod je charakterizován teplotou fázového přechodu T_M – teplotou tání.

Se zvyšující se teplotou dochází u amorfních látek k přechodu ze skelného stavu do stavu kaučukovitého. Tato přeměna se uskutečňuje v určitém teplotním intervalu, který je nazýván skelný přechod. Střední teplota tohoto intervalu je nazývána teplota zesklenní T_g . Na druhé straně zde není možné jednoznačně určit teplotu tání [8].

3.4 Silikátové pryskyřice

Silikonové tvrditelné pryskyřice se uplatňují jako vypalovací elektroizolační laky a smalty, ochranné laky, pojivo pro speciální lisovací hmoty a vrstvené hmoty a jako modifikující složky pro různé plastické hmoty, které zvětšuje teplotní rozsah jejich upotřebení, zmenšuje nasákavost a zlepšuje elektrické vlastnosti.

Silikonové pryskyřice můžeme rozdělit např. na metylsilikonové a metylfenylsilikonové pryskyřice.

3.4.1 Methylsilikonové pryskyřice – Lukosil M 130

Představuje moderní typ za pokojové teploty zasychajícího silikonového laku a je špičkovým výrobkem ve své kategorii. Je to roztok silikonové pryskyřice v xylenu jako rozpouštědle. Je možné ho vytvrdit teplotou bez použití katalyzátoru. Při pokojové teplotě vytváří Lukosol M 130 nelepivý, pružný a mechanický poměrně odolný film. Tepelným vytvrzením se dosáhne zvýšení jeho tvrdosti, mechanické a chemické odolnosti a stabilizuje se pro trvalé tepelné namáhání.

Hlavní použití Lukosilu M 130 je jako pojivo pro výrobu tepelně odolných nátěrových hmot s použitím do 350°C. Lukosil M 130 v nátěrových hmotách zasychá při normální teplotě, což je výhodné zejména u výrobků, které se vytvrzují při vlastním použití. Pro svoje výborné separační vlastnosti je možno Lukosil M 130 použít jako

mechanicky odolný separační nátěr forem pro odlévání a lisování pryskyřic, plastických hmot a kaučuků. Pro tyto účely je třeba nátěr tepelně vytvrdit. Vytvrzovací teplota v závislosti na čase jsou: 180°C / 2 hod, 190°C / 1 hod, 200°C / 45 min. Není nutno používat katalyzátor [4].

3.4.2 Metylfenylsilikonové pryskyřice

Obsahuje na rozdíl od metylsilikonových pryskyřic ještě fenylskupiny, které zvyšují jejich tepelnou odolnost při zachování stávajících vlastností metylsilikonových pryskyřic. Pro svoje vynikající elektroizolační vlastnosti, stálost proti korozi, fungistabilitu, odolnost vůči působení chemikálií mají široké použití u výrobců elektrických strojů pracujících ve ztížených podmínkách a tepelné třídě H (180°C trvale), jako jsou pohonné jednotky elektrických lokomotiv, tramvají, elektrických motorů pracujících ve vysoké relativní vlhkosti apod. Dále se používají jako lepicí laky pro výrobu slídových izolantů, azbestového papíru a impregnované sklotkaniny také jako pojivo ve vysoce tepelně stálých nátěrových hmotách.

Všechny metylfenylsilikonové laky vyžadují vytvrzování při teplotách min. 200°C a většinou ještě katalyzátor k jejich rychlejšímu vytvrzení. Nanášení laků na předměty se provádí stříkáním, máčením, poléváním a natíráním. Postup tepelného vytvrzení a náběhu vytvrzovací teploty je individuální a je závislý na způsobu nanášení, charakteru výrobku, použitého laku a katalyzátoru.

Methylfenylsilikonových pryskyřic je několik druhů, které jsou označovány podle obecných vlastností. Jejich obchodní názvy jsou Lukosil 150(X), 200(X), 4101, 4102, 4107 a 901 [4].

3.4.3 Lukosil 901

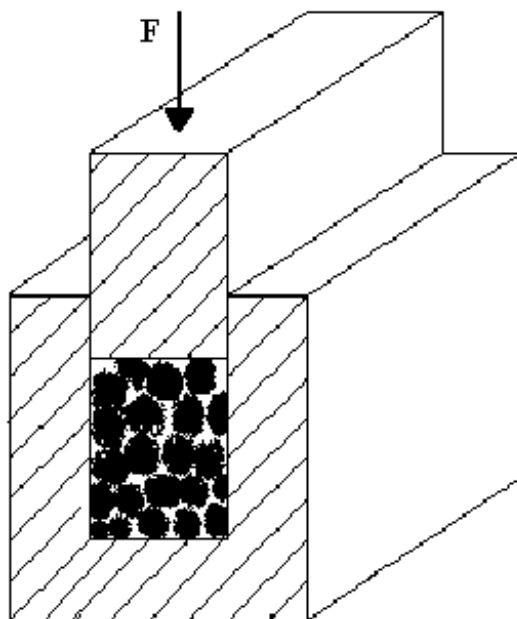
Lukosil 901 je bezbarvý až nažloutlý roztok metylfenylsilikonové pryskyřice se zvýšeným obsahem sušiny v toluenu. Tento roztok slouží jako pojivo při výrobě skelných laminátů, které rovněž vyhovují požadavkům tepelné izolační třídy H. Ke každé operaci se dodávají katalyzátory pro snížení doby vytvrzení – Lukosil katalyzátor C63 a Lukocil katalyzátor C64 [4].

3.5 Postup výroby kompozitů s čedičovými vlákny

Čedičová vlákna s obchodním názvem Sudaglas byla nejprve zbavena lubrikace, která je chrání před poškozením, pomocí acetonového ředidla. Dále byly pramence impregnovány polysiloxanovou pryskyřicí s obchodním názvem Lukosil M 130 (Siloxan). Takto naimpregnované vzorky byly ponechány 24 hodin při pokojové teplotě a následně navrstveny na sebe do formy viz. obr. 9. [4], která byla předem vyložena pergamenovým papírem. Následně byla forma upnuta pomocí 2 čelistí a tím byla vyvozena tahová síla F .

Takto připravený prepreg byl vložen do sušičky postupně zahříván na teplotu 50°C po dobu 24 hodin. Dále byla teplota zvyšována na hodnotu 100°C a doba zahřívání byla opět stanovena na 24 hodin. Jako další krok v postupu výroby bylo vytvrzení vzorku v peci při počáteční teplotě 130°C Konečné teplotě 250°C s dobou vytvrzení 24 hodin.

Dále byl vzorek ještě dotvrzen až do teploty 900°C po dobu 24 hodin. Oddělování vzorku na délku 5 mm bylo uskutečněno přesnou pilou IsoMet 1000 [13].



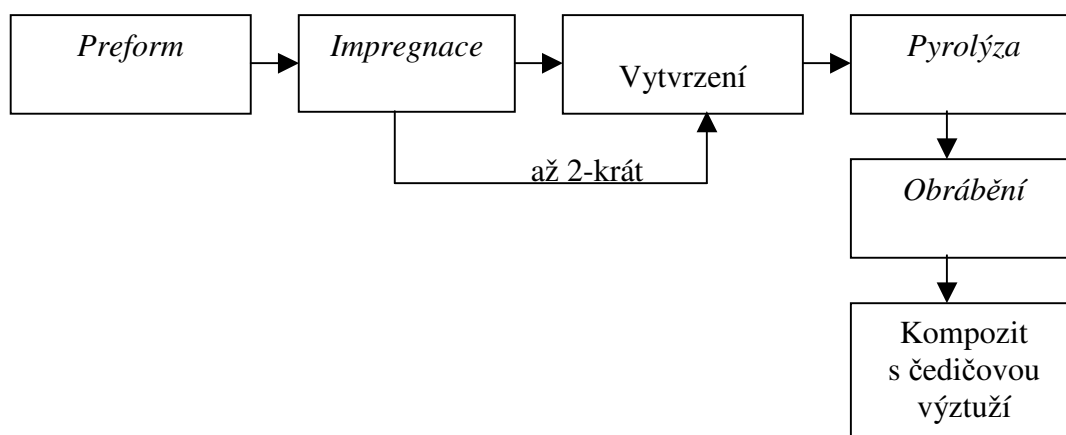
Obr. 9: Uložení vláken ve formě sloužící pro lisování vzorků kompozitu

Klíčovým momentem výroby kompozitů s čedičovou výztuží je vytvoření čedičové výztuže, která co nejlépe vyplňuje mezivláknový prostor a přitom má požadované vlastnosti. Na prekursor jsou kladeny dva základní požadavky: dostatečně nízká viskozita a co největší výtěžek pyrolyzačního zbytku.

Proto – zejména u klasické technologie výroby kompozitů s čedičovou výztuží – se dává přednost nízké viskozitě prekursoru; výsledný nízký výtěžek čedičové výztuže je nutno kompenzovat mnohonásobnou impregnací a opětovnou pyrolýzou v inertní atmosféře dusíku. Tato technologie vychází z kladení kabílku vhodných nekonečných vláken na otáčící se bubnový válec poháněný krokovým motorem, kde vzniká textilní útvar (prepreg). Bubnový válec je ještě před kladením opatřený vrstvou vhodného papíru z důvodu lepší manipulace. Prepreg se před kladením mnohonásobně impregnuje prekursorem matrice a následně pyrolyzuje v inertní atmosféře podle schématu na obr.10.

Aby se omezil vznik trhlin je rychlost zvyšování teploty při pyrolýze velmi nízká. Pyrolýza je prováděna v inertní dusíkové atmosféře, jelikož oxidační atmosféra způsobuje poškození vláken a tak by docházelo k nedostatečnému zpevnění vláken s matricí. V průběhu pyrolýzy se uvolňuje voda, vodík a zůstane jen čistý uhlík, kyslík a křemík. Pyrolýzu je možno urychlit zvýšením tlaku. Počet impregnačních kroků lze snížit také zvýšením tlaku.

Celý výrobní proces je krátký .



Obr.10: Schéma klasické výroby kompozitů s čedičovou výztuží

3.6 Použití kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se využívají v letectví, automobilovém průmyslu, na výrobu sportovních potřeb. U vláknových kompozitů vyplývá využití vynikající pevnosti, tuhosti a nižším nákladů na výrobu. Při kombinaci vynikajících mechanických vlastností s konstrukční přizpůsobivostí a snadné výroby, které kompozity nabízejí. Zároveň s výrobou konstrukce nebo prvku je vytvářena i struktura materiálu [1].

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4 METODA MĚŘENÍ TEPLOTNÍ ROZTAŽNOSTI

4.1 Experimentální materiál

Pro stanovení základních vlastností vláken byly použity dva druhy čedičových vláken. Čedičová vlákna jsou ve formě nekonečného hedvábí. Čedič z Belgie – Basaltex (měrná hmotnost 2800 kg/m^3) a čedič z Ruska – Kamenný věk (měrná hmotnost 2660 kg/m^3). Byla zjišťována měrná hmotnost (hustota), jemnost, průměr a pevnost vlákna. Tato měření byla prováděna na různých přístrojích.

U kompozitního materiálu byla stejná výztuž a to čedičová vlákna Sudaglas a pryskyřice 130 (siloxan), ale byly pyrolyzovány při různých teplotách:

- kompozit 1. byl bez pyrolýzy a měl měrnou hmotnost 2030 kg/m^3 ,
- kompozit 2. byl pyrolyzován na 600°C a jeho měrná hmotnost byla 2010 kg/m^3 ,
- kompozit 3. byl pyrolyzován na 700°C a jeho měrná hmotnost byla 2080 kg/m^3 ,
- kompozit 4. byl pyrolyzován na 800°C a jeho měrná hmotnost byla 2040 kg/m^3 ,
- kompozit 5. byl pyrolyzován na 900°C a jeho měrná hmotnost byla 2000 kg/m^3 .

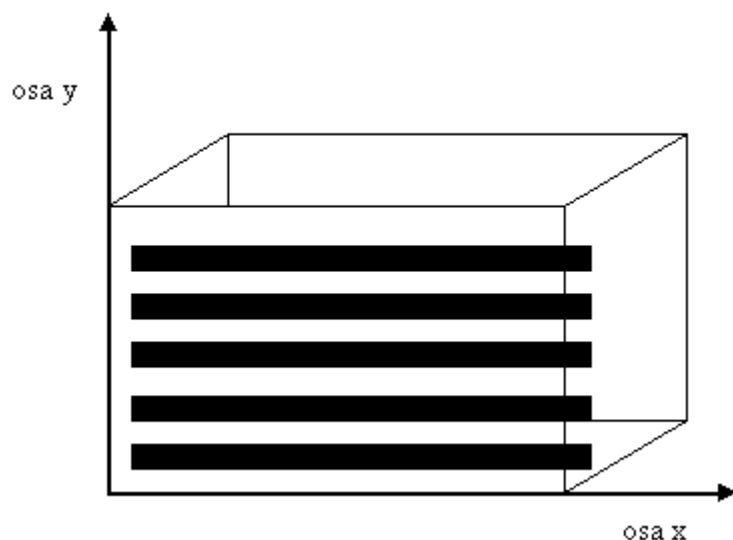
Kompozit měl na počátku rozměr $4,4 \times 0,59 \times 0,36 \text{ [cm]}$. Pro měření byl kompozit nařezán pomocí přesné pily na malé kvádrčky o rozměru $0,5 \times 0,59 \times 0,36 \text{ [cm]}$. U těchto kompozitů byla sledována změna vzorku po termomechanickém namáhání na vzpěr a na podélný směr.

4.2 Formulace problému

Cílem této práce bylo zjištění termomechanických vlastností kompozitních materiálů s čedičovou výztuží.

Měřeným materiálem byly kompozity vyztužené jednosměrně uspořádanými čedičovými vlákny. Vzorky byly vyrobené v USMH, které byly za různých teplot pyrolyzovány.

Tyto kompozity byly tepelně zatěžovány ve směru osy vyztužujících vláken dále označován jen jako směr osy x a kolmo na směr osy vyztužujících vláken dále označován jako směr osy y viz. obr. 11 [4].



Obr. 11: Orientace vzorku

Termomechanické vlastnosti hrají důležitou roli při konečném využití kompozitních materiálů. Pro jejich určování je vhodné experimentální zatížení firmy R.M.I., konkrétně termomechanický analyzátor TMA CX03R.

Pro měření na termomechanickém analyzátoru byl zvolen experiment pro stanovení koeficientů teplotní roztažnosti. Hodnoty různých parametrů měření (cílové teploty, rychlosti ohřevu a chlazení, také doby expozice) byly voleny tak, aby bylo možno co nejkomplexnější poznání změn materiálu. Bylo použito ještě rastrovacího elektronového mikroskopu, který umožnil zaznamenat změny povrchové struktury po provedené teplotní expozici.

4.3 Teoretická analýza problému

V průběhu měření termomechanických vlastností je možné sledovat čtyři základní veličiny a to:

- napětí
- deformace
- teplota
- čas

Tyto veličiny se dají různě kombinovat, což umožňuje provést celou řadu různých měření lišících se druhem veličiny, která je během experimentu konstantní.

Možnosti experimentů, které termomechanická analýza umožňuje provést jsou:

- Rovnoměrné zvýšení teploty při konstantním zatížení. Dá se zjišťovat teplotní roztažnost, teploty zesklenní a deformační.
- Působení konstantní teploty při konstantním zatížení. Dá se zjišťovat creep (kvantitativní určení nevratných deformací při dlouhodobém zatížení).

4.4 Teplotní roztažnost

Teplotní roztažností materiálu rozumíme změnu rozměrů tělesa z něho vyrobeného v závislosti na teplotě za konstantního tlaku. Tato změna se týká buď rozměrů délkových, pak mluvíme o roztažnosti délkové, nebo objemu či-li roztažnosti objemové. Teplotní roztažnost je způsobena pohybem hmotných částic do vyšších energetických hladin, při kterém se amplitudy jejich kmitavého pohybu zvětšují v důsledku zvyšování teploty. Z jiného pohledu jde o posun střední polohové souřadnice kmitající částice způsobené nesymetrickým prostorem pro její pohyb z čehož vyplývá, že částice koná neharmonický pohyb tudíž neharmonické kmitání. Narůstající vzdálenost mezi částicemi a vliv posunu střední polohové souřadnice částice se pak projeví roztažností vlastního materiálu. Tu kvantitativně charakterizuje součinitel teplotní roztažnosti.

Délkové rozměry materiálu se mohou měnit ve směru podélném a příčném. Podle toho též rozlišujeme příčný součinitel teplotní roztažnosti α_v a podélný součinitel teplotní roztažnosti α_p . Ten v případě vláken s nižším součinitelem roztažnosti, než je matrice způsobuje omezování mechanického protahování materiálu matrice. Příčný součinitel α_v v kompozitech s malým objemovým podílem vláken může být vyšší, než součinitel v podélném směru α_p a potom matrice je nucena se rozšiřovat do příčného směru více.

Součinitel teplotní roztažnosti závisí lineárně na součinitelích teplotní roztažnosti jednotlivých složek a na jejich mechanických charakteristikách (modul pružnosti v tahu, Poissonovo číslo).

V jednosměrném kompozitu jsou teplotní součinitelé v podélném a příčném směru zcela odlišné. Teplotní závislost délkové roztažnosti je vyjádřena dilatační křivkou. Jak již bylo řečeno, délka vzorku závisí na teplotě. Tuto závislost lze vyjádřit lineárním vztahem [4.4.1.]:

$$L = L_o (1 + \alpha \Delta t) \quad [4.4.]$$

kde L_0 [mm] je původní výška vzorku. Z tohoto vztahu je patrné, že koeficient lineární roztažnosti α vyjadřuje relativní prodloužení vztažené na jednotku délky, které je způsobeno zahřátím vzorku o jeden stupeň.

4.5 Termomechanický analyzátor TMA CX03R

Termomechanický analyzátor TMA CX03R slouží k zjišťování základních termomechanických vlastností pevných látek. Přístroj pro termomechanickou analýzu pracuje na principu měření dilatace vzorku vyvolaných zahřátím vzorku. Vzorek je zatěžován volitelnou silou. Přístroj umožňuje cyklické zatěžování dvěma různými silami. Rozborem dilatační křivky se stanovuje teplota přechodu I. a II. řádu (teplota tání a teplota zesklenní) materiálu vzorku a koeficient teplotní roztažnosti [15].

Princip je založen na měření změn délky studovaného vzorku v závislosti na teplotě, času a zadané síle. Veškeré výstupy lze získat jak v grafické podobě, tak ve formě datového výstupu ve formátu ASC II.

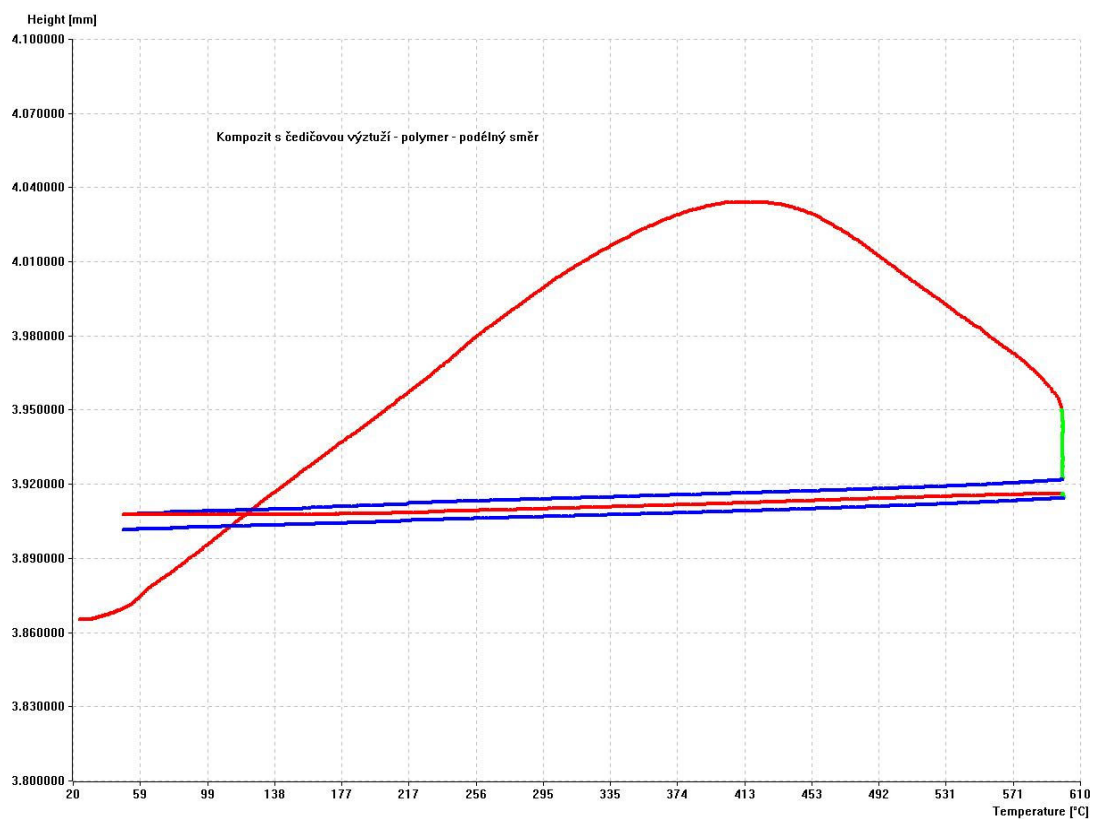
Švejka [16] udává následující parametry přístroje:

Tab. 5: Parametry termomechanického analyzátoru

Rozsah	0 – 20 mm
Rozlišení	0,01 μm
Stabilita základní linie	$< 0.002 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ (30 – 500 $^\circ\text{C}$) $\pm 0,2 \mu\text{m}/\text{den}$
Síla na vzorek	0 – 1000 mN s krokem 1 mN
Přesnost zadané výšky	$< \pm 1\%$
Rozsah teplot	30 – 800 $^\circ\text{C}$
Rychlost ohřevu (chlazení)	0 – 10 K/min
Přesnost teplotní regulace	$\pm 2^\circ\text{C}$

Data naměřená termomechanickým analyzátozem lze vyhodnotit pomocí programu TMA Grapher [15], který je jeho doprovodný softwarem. Tento program byl vytvořen pro vyhodnocování a tvorbu termomechanické analýzy.

Tento program nakreslí křivku, která odpovídá nám zadanému programu 1, který je uveden dále. Tato křivka se nazývá dilatační křivka a je na obr.12.



Obr. 12: Dilatační křivka

Popis daných křivek:

- Červená křivka znázorňuje ohřev materiálu
- zelená křivka znázorňuje izotermu
- modrá křivka znázorňuje chlazení.

Funkce daných křivek:

- První a čtvrtá křivka je lineární expanzní koeficient ohřevu
- druhá a pátá křivka je závislost izotermu na čase
- třetí a šestá křivka je lineární expanzní koeficient ochlazení.

Všechny funkce termomechanického analyzátoru jsou řízeny prostřednictvím klávesnice počítače. Vlastní řídicí program obsahuje toto menu:

➤ Calibration

Kalibrační menu se skládá z těchto položek:

- Zero Height (kalibrace nuly snímače výšky vzorku)
- Firce Motor (kalibrace silového motoru)
- Temperature (kalibrace měření teploty)
- Height Scale (kalibrace snímače výšky vzorku)
- Probe Change (výměna křemenového měřicího přípravku)

➤ Masurement

Měřicí menu, skládá se z těchto položek:

- Sample (vlození a vyjmutí vzorku)
- Program (programování průběhu měření)
- Filter (nastavení filtru pro měření výšky vzorku)
- Manual Meas. (měření vzorku přímo řízenou obsluhou)
- Program Meas. (měření vzorku podle programu)

➤ Exit

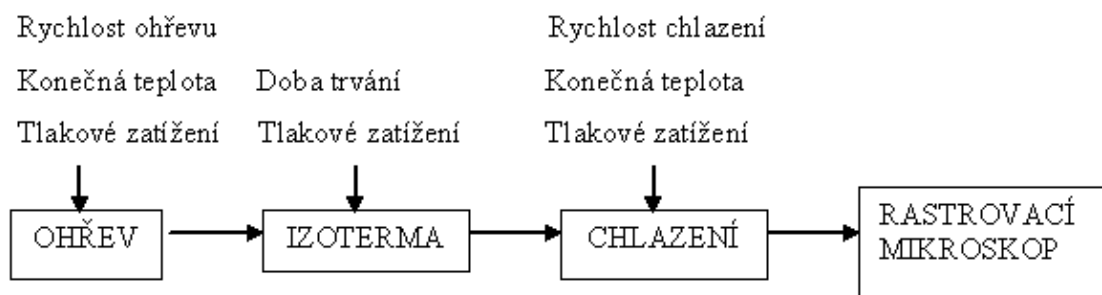
Toto menu obsahuje přímo dva výkonné povely:

- Cancel (provede návrat do základního menu)
- Exit (provede se ukončí programu)

5 NÁVRH EXPERIMENTU

5.1 Popis experimentu

Experimenty jsou vždy řazeny podle jednotného schématu:



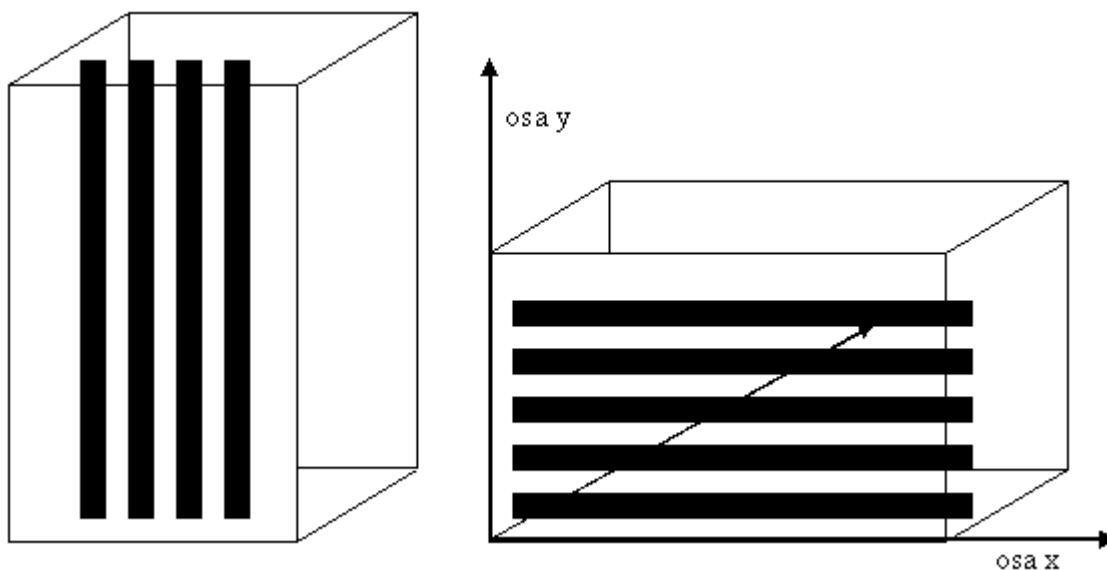
Samostatný experiment je rozdělen do čtyř kategorií. V první a druhé jsou kompozity vystaveny tepelnému zatěžování bez mechanického působení v režimu; lineární ohřev a izotermický ohřev. Ve třetí části experimentu je pak každý vzorek podrobený ochlazování. Tento cyklus byl zařazen vždy dvakrát. Přesné nastavení je popsáno níže viz. Program 1. Program byl použit pro zjišťování teplotní roztažnosti kompozitů. Ve čtvrté části byly vzorky zkoumány pomocí elektrického rastrovacího mikroskopu.

Program 1:

1. krok – OHŘEV: $T = 600^{\circ}\text{C} / 3^{\circ}\text{C} / 10\text{ s}$ při statické síle $F_s = 10\text{ mN}$
2. krok – IZOTERMA: 60 min. při $F_s = 10\text{ mN}$
3. krok – CHLAZENÍ: $50^{\circ}\text{C} / -3^{\circ}\text{C} / 10\text{ s}$ při statické síle $F_s = 10\text{ mN}$

Zkoušené kompozity byly namáhány ve směru podélném a ve směru příčném. Pro usnadnění orientace v naměřených hodnotách bylo použito modelů viz obr. 13. [4].

Měřeným materiálem byly, jak už bylo uvedeno výše, pět typů kompozitů jednosměrně vyztužené čedičovými nekonečnými vlákny s matricovým prekursorem a to Lukosil M 130.



Obr. 13: Orientace uložení vzorku při experimentu (x – vzpěr, y – podélný směr, kolmo na osy vláken).

5.2 Přesná pila IsoMet 1000

Přesná pila IsoMet 1000 obr.14 [26] s automatickým vypínáním po ukončení funkce se zabudovaným digitálním mikrometrem s kolmým posuvem k rovině řezání pro nastavení vzorku, odstranitelná vanička pro chlazení, se zabudovaným zařízením pro oživování ostří [13].



Obr. 14: Přesná pila IsoMet 1000

Použitý roztok k řezání je v poměru 1:9 a to 1 dílek Buehler Isocut Plus Cutting Fluid a 9 dílků vody. Tento roztok chladí pilu a odplavuje malé úlomky z kompozitu do vaničky. Rychlost řezání byla 200 ot/min a zátěž 50g.

Přesná pila nám umožňuje řezat vždy stejně široký kompozit. Takto nařezané kompozity se lépe porovnávají, je tam malé procento rozdílu.

5.3 Princip rastrovací elektronové mikroskopie VEGA

Rastrovací elektronový mikroskop VEGA umožňuje pozorování vzorků v klasickém režimu s nutností naprašování vodivou vrstvou kovu (Au, Ag, atd.). Pracuje s vysokým vakuem v preparátorové komoře. Mikroskop pracuje v režimu sekundárních odražených elektronů. K tomu slouží 2 druhy detektorů – pro sekundární elektrony a pro odražené elektrony. Výstup obrazu z mikroskopu je buď v tištěné nebo elektronické formě (*.bmp, *.jpg). Systém je vybaven aktivizací a zpracování obrazu [14].

Systém VEGA se skládá ze tří základních částí:

- Fyzikální části
- Elektroniky
- Počítače

Fyzikální část je plně svázána se vzorkem a vzniká v ní obraz.

Část systému obsahuje:

- *Optický systém* – formuluje a polohuje elektronový paprsek
- *Detekční systém* – detektor produktů interakce elektronového paprsku s povrchem vzorku
- *Komora s manipulátorem* – slouží k polohování vzorku vzhledem k ose tubusu
- *Vakuový systém* – zajišťuje v prostoru tubusu a komory existenci vakua nutného pro činnost mikroskopu.

Elektronika mikroskopu zprostředkovává ovládání fyzikální části mikroskopu a předávání užitečných signálů počítači. Počítač je řídicí jednotkou celého mikroskopického systému.

5.4 Stanovení koeficientu teplotní roztažnosti

Pro stanovení koeficientu teplotní roztažnosti byly použity kompozity o rozměru 0,5 x 0,59 x 0,36 [cm]. Vzorek jsme proměřovali podélně a na vzpěr. Zjišťovali jsme co se s daným vzorkem stane při dvojím projitím procesu na ohřev a ochlazení. Tyto vzorky byly proměřovány v termomechanickém analyzátoru TMA CX03R

Pro zkoušení teplotní roztažnosti kompozitů s čedičovou výztuží byl zvolen program dvojitého ohřevu a ochlazování viz. 5.1. Program 1.

5.5. Rozdělení experimentu

Experiment je rozdělen na 4 části:

1. Lineární ohřev

Kompozity jsou podrobeny lineárnímu ohřevu do teploty 600°C s teplotním vzrůstem 3°C / 10 s a to bez působení tlakové síly $F = 0$ N.

2. Izotermický ohřev

V tomto experimentu jsou kompozity zahřívány izotermicky po dobu 60 min. také bez zatěžovací síly $F = 0$ N.

3. Lineární chlazení

Kompozity jsou podrobeny lineárnímu ochlazování na konečnou teplotu 50°C se spádem 3°C / 10 s při nulovém statickém namáhání $F = 0$ N.

4. Zkoumaný povrch

Zkoumaný povrch kompozitu byl pozorován před a po teplotní expozici pomocí rastrovací elektronové mikroskopie. Příprava preparátu spočívá v upevnění vzorku na podložní stoleček a v opatření povrchu vodivé vrstvy systémem iontového rozprašování katody.

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A JEJICH DISKUZE

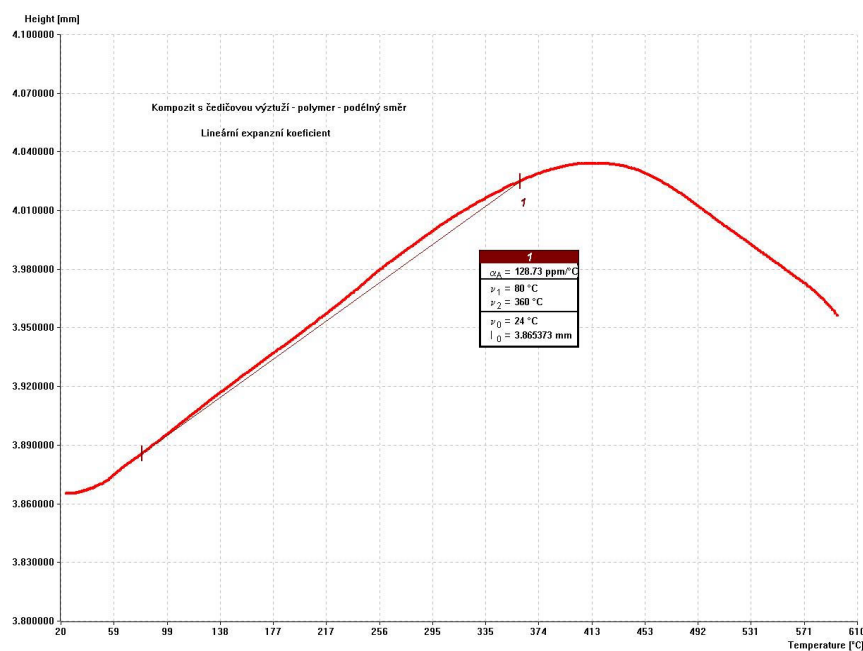
6.1 Stanovení koeficientu teplotní roztažnosti

Pro výpočet koeficientu teplotní roztažnosti v závislosti na teplotě pro jednotlivé typy kompozitů bylo použito spojitých závislostí.

Naměřená data byla přenesena do vyhodnocovacího programu TMA Grapher, kde byla zpracována. Koeficient teplotní roztažnosti byl stanoven v rozsahu 80°C – 360°C pro každý zkoumaný vzorek, aby se dilatační křivkou dala proložit přibližně přímka viz. obr.15. Výsledky naměřených hodnot jsou uvedeny v tab. 5. Jejich grafická znázornění jsou uvedena v příloze 7.

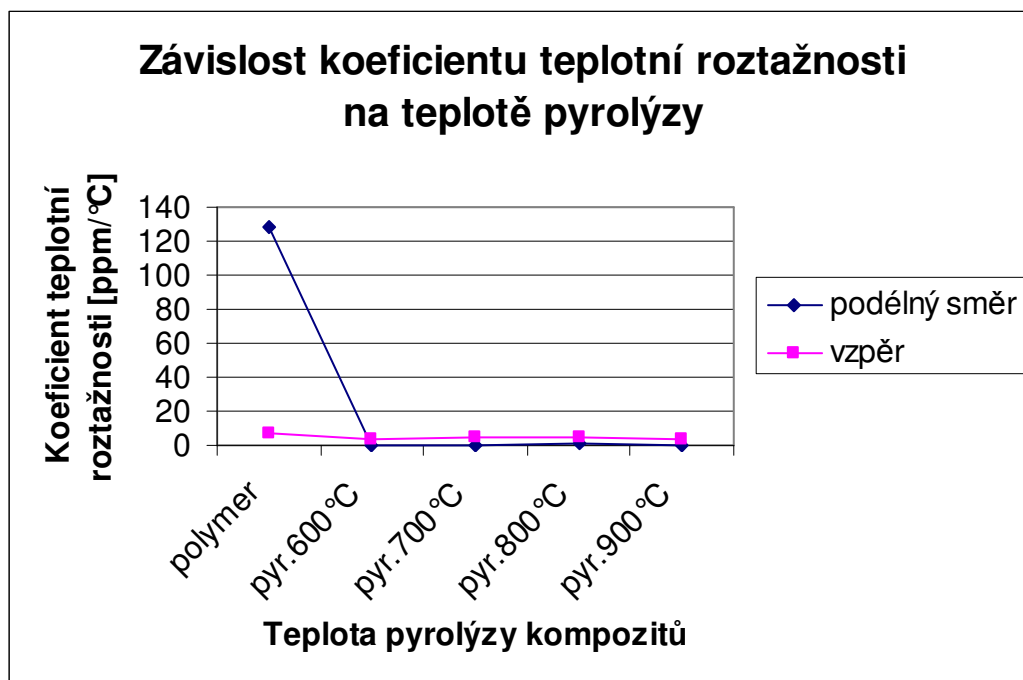
Tab.5: Koeficient teplotní roztažnosti

Koeficient teplotní roztažnosti		
Vzorek	podélný směr	vzpěr
	α_p [ppm/°C]	α_v [ppm/°C]
polymer	128,73	6,66
pyr.600 °C	0,33	4,09
pyr.700 °C	0,33	4,17
pyr.800 °C	0,74	4,33
pyr.900 °C	0,44	3,67



Obr. 15: Lineární expanzní koeficient z první křivky ohřevu - polymer podélný směr

Na obr.16. je grafické znázornění závislosti koeficientu teplotní roztažnosti na teplotě pyrolýzy. Z tohoto grafu je vidět rozdíl mezi namáháním na podélný směr a na vzpěr. U kompozitu, který nebyl pyrolýzován (polymer) je vidět větší koeficient teplotní roztažnosti. U ostatních kompozitů je koeficient roztažnosti nepatrný.



Obr.16: Graf - Závislost koeficientu teplotní roztažnosti na teplotě pyrolýzy

6.2 Rozměrová změna vzorků – ohřev a chlazení

Průběh měření změny výšky vzorku v závislosti na teplotě ve fázi ohřev a chlazení je uvedeno v příloze 7. Číselné hodnoty této změny jsou uvedeny pro jednotlivé typy kompozitů v tab. 6. Změna stavu vzorku je uvedena v příloze 8. Zde jsou vidět změny působení tepla na jednotlivé kompozity.

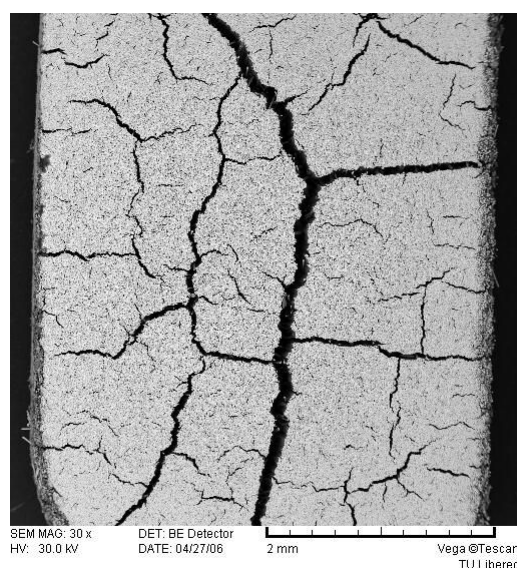
Tab. 6: Rozměrové změny vzorků

Rozměrová změna vzorků						
Vzorek	podélný směr			vzpěr		
	ohřev	chlazení	Rozdíl	ohřev	chlazení	Rozdíl
	l [mm]	l [mm]	l [mm]	l [mm]	l [mm]	l [mm]
polymer	3,86537	3,86541	-0,00004	4,72583	4,72592	-0,00009
pyr.600°C	4,20374	4,20385	-0,00011	5,25922	5,25971	-0,00049
pyr.700°C	4,00740	4,00754	-0,00014	4,77546	4,77547	-0,00001
pyr.800°C	3,80884	3,80884	0,00000	4,66666	4,66666	0,00000
pyr.900°C	3,54696	3,54696	0,00000	4,71082	4,71082	0,00000

Z tab.6. je vidět jen nepatrná změna rozměrů zkoumaných vzorků jednotlivých kompozitů v podélném směru a na vzpěr při ohřevu a následném chlazení.

Při tomto měření se potvrdilo, že kompozity které byly pyrolyzovány na vyšší teplotu než 600°C, která byla dána v programu TMA jako nejvyšší teplota ohřevu, se s daným kompozitem nic nestalo, ale jenom po rozměrové změně. Změna nastává, ale ve změně stavu kompozitu. Z elektronového rastrovacího mikroskopu je vidět změna povrchu a uspořádání vláken v kompozitu. Tyto změny jsou v příloze 8.

Největší změna nastala u kompozitu, který nebyl pyrolyzován a to tak, že se celý povrch popraskal, vznikly praskliny, ale kompozit i přesto zůstal v celku, obr. 17. U kompozitu, který byl pyrolyzován na 600°C také vznikly prasklinky, ale malé, což je asi způsobeno tím, že kompozit nebyl pyrolyzován přesně na 600°C. U kompozitu s pyrolýzou 700°C, 800°C a 900°C se s povrchem nic nezměnilo. Změna povrchu je asi způsobeno křehkostí materiálu.



Obr. 17: příčný pohled na kompozit po TMA

Tab. 7: Přehledná tabulka změn rozměrů u jednotlivých kompozitů

Přehledná tabulka změn rozměrů u jednotlivých kompozitů					
Kompozit	Barva	Praskliny	Povrch	Průměr vláken	Struktura
1	nezměněná	hodně	nezměněný	špatný	nezměněná
2	zesvětlal	málo	světlý střed tmavý kolem	dobry	roztřepený
3	zesvětlal víc	nepatrné	světlý střed tmavý kolem	dobry	roztřepený
4	nezměněná	skoro žádné	nezměněný	dobry	nezměněná
5	nezměněná	žádné	nezměněný	dobry	nezměněná

7 ZJIŠŤOVÁNÍ PARAMETRŮ ČEDIČOVÝCH VLÁKEN

Cílem této práce bylo zjištění měrné hmotnosti, jemnosti a průměru nekonečných čedičových vláken. Měrná hmotnost byla zjišťována vážením na vzduchu a v kapalině (destilované vodě). Průměr vláken byl zjišťován na rastrovacím elektronovém mikroskopu a na světelném mikroskopu (s programem Lucia G). Byla změřena i jemnost na Vibroskopu 400. Naměřené hodnoty, průměr a jemnost, byly pak vyhodnocovány a porovnávány.

7.1 Stanovení hustoty čedičového rovingu

Stanovení hustoty rovingu bylo provedeno dvojím vážením:

- Vážením rovingu za sucha na vzduchu a následně vážením za mokra v kádince s destilovanou vodou, kapitola 7.1.1.
- Stanovení hustoty rovingu se provádělo zvážením hmotnosti rovingu na vzduchu před pyropýrzou, kapitola 7.1.2 a zvážením hmotnosti rovingu po pyrolýze, kapitola 7.1.3. Vzorek rovingu byl vysušen v sušičce na teplotu 100°C, pak byl uložen do exsikátoru, který obsahuje silikagel (odvádí vlhkost). Následně byl zvážen na digitální váze (Sartorie) a vložen do pece (Nabertherm). Pec byla zahřívána na teplotu 750°C a roving tam byl ponechán 5 minut. Po vytažení byl vzorek rovingu zvážen a vložen do exsikátoru.
- Stanovení hustoty rovingu po pyrolýze s odstupem 24 hodin se provádělo za sucha na vzduchu a následně vážením za mokra v kádince s destilovanou vodou, Kapitola 7.1.3.

7.1.1 Stanovení hustoty rovingu vážením

Tab. 8: Naměřené hodnoty hmotností rovingu Basaltex

Basaltex				
vzorek	A	B	C	ρ [kg/m ³]
2	3,8734	2,5219	3,873	2866
3	3,7626	2,4365	3,7625	2837
4	3,6507	2,3638	3,6507	2837
5	4,0521	2,6174	4,052	2824
6	3,7323	2,4107	3,7321	2824
x	3,8142	2,4701	3,8141	2838
s2	0,1551	0,1004	0,155	17
s	0,3938	0,3169	0,3938	4
v	10,3247	12,8294	10,3237	0

Tab.9: Naměřené hodnoty hmotností rovingu Kamenný věk

Kamenný věk				
vzorek	A	B	C	ρ
2	3,2522	2,0356	3,2517	2673
3	3,2094	2,0208	3,2081	2700
4	3,1482	1,9701	3,1477	2672
5	3,2162	2,0295	3,2177	2710
6	3,2038	2,0107	3,2034	2685
x	3,206	2,0133	3,2057	2688
s2	0,0374	0,0259	0,0375	17
s	0,1934	0,161	0,1937	4
v	6,0324	7,9977	6,0434	0

Vzorec pro výpočet hustoty rovingu:

$$\rho = \frac{A}{(A - B)} * 1000 \quad [7.1.1.]$$

A – hmotnost pevné látky (rovingu) na vzduchu [g]

B – hmotnost pevné látky (rovingu) v destilované vodě [g]

C – hmotnost pevné látky (rovingu) po vysušení [g]

ρ_{vody} - hustota destilované vody při teplotě 22 °C - 1000 [kg/m³]

ρ - hustota pevné látky (rovingu) [kg/m³]

7.1.2 Stanovení hustoty rovingu vážením – před pyrolýzou

Tab. 10: Naměřené hodnoty hmotností rovingu Basaltex – před pyrolýzou

Basaltex				
vzorek	hmotnost [g]			ρ [kg/m ³]
	a	b	c	
1	3,7676	3,7769	-0,0093	3758
2	3,8461	3,8541	-0,008	3838
3	3,9173	3,927	-0,0097	3908
4	3,9528	3,9633	-0,0105	3942
5	3,8566	3,8636	-0,007	3850
6	3,7557	3,7651	-0,0094	3746
7	4,0996	4,1095	-0,0099	4090
8	3,7125	3,7221	-0,0096	3703
9	3,6453	3,6524	-0,0071	3638
10	3,729	3,738	-0,009	3720
průměr	3,82825	3,8372	-0,00895	3819

Tab. 11: Naměřené hodnoty hmotností rovingu Kamenný věk – před pyrolýzou

Kamenný věk				
vzorek	hmotnost [g]			ρ [kg/m ³]
	a	b	c	
1	3,2183	3,2149	0,0034	3222
2	3,1874	3,1842	0,0032	3191
3	3,2478	3,2447	0,0031	3251
4	3,1767	3,1742	0,0025	3179
5	3,223	3,2205	0,0025	3226
6	3,1903	3,1883	0,002	3192
7	3,2341	3,2318	0,0023	3236
8	3,1741	3,1722	0,0019	3176
9	3,1839	3,1815	0,0024	3186
10	3,214	3,2113	0,0027	3217
průměr	3,20496	3,20236	0,0026	3208

Vzorec pro výpočet hustoty rovingu:

$$\rho = \frac{a}{(a-b)} * 1000 \quad [7.1.2.]$$

a – hmotnost pevné látky (rovingu) před pyrolýzou [g]

b – hmotnost pevné látky (rovingu) po pyrolýze [g]

c – rozdíl hmotnosti pevné látky (rovingu) před a po pyrolýze [g]

ρ - hustota pevné látky (rovingu) [kg/m³]

7.1.3 Stanovení hustoty rovingu vážením – po pyrolýza s odstupem 24 hodin

Tab. 12: Naměřené hodnoty hmotností rovingu Basaltex – po pyrolýze

Basaltex				
vzorek	hmotnost [g]			ρ [kg/m ³]
	a	b	c	
1	3,7736	2,3828	1,3908	2713
2	3,8518	2,4595	1,3923	2767
3	3,9301	2,5454	1,3847	2838
4	3,9659	2,5507	1,4152	2802
5	3,8667	2,4338	1,4329	2699
6	3,7674	2,393	1,3744	2741
7	4,1106	2,6867	1,4239	2887
8	3,725	2,3883	1,3367	2787
9	3,6561	2,3453	1,3108	2789
10	3,7407	2,3034	1,4373	2603
průměr	3,83879	2,44889	1,3899	2762

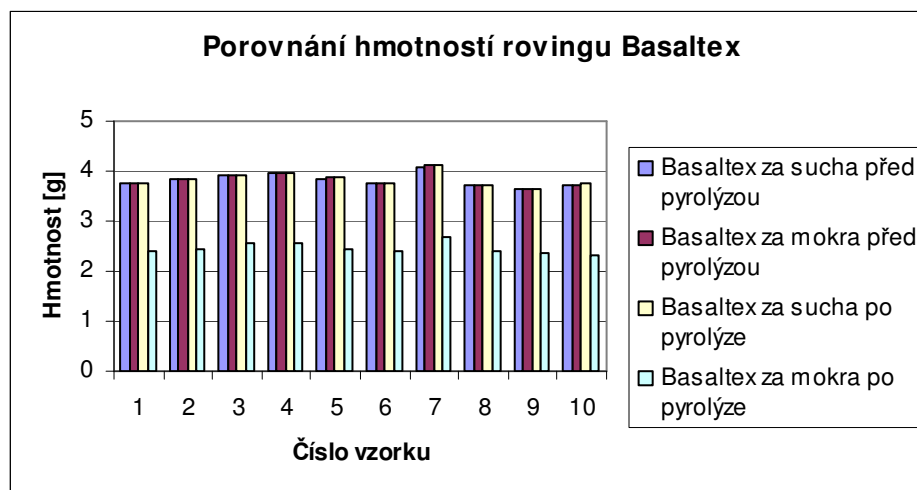
Tab. 13: Naměřené hodnoty hmotností rovingu Kamenný věk – po pyrolýze

Kamenný věk				
vzorek	hmotnost [g]			ρ [kg/m ³]
	a	b	c	
1	3,2152	2,0112	1,204	2670
2	3,1867	1,9645	1,2222	2607
3	3,2439	2,0015	1,2424	2611
4	3,1741	1,9646	1,2095	2624
5	3,2192	1,9884	1,2308	2616
6	3,1871	1,9795	1,2076	2639
7	3,2333	2,0031	1,2302	2628
8	3,1734	1,9343	1,2391	2561
9	3,1824	1,9497	1,2327	2582
10	3,2113	1,9712	1,2401	2590
průměr	3,20266	1,9768	1,22586	2613

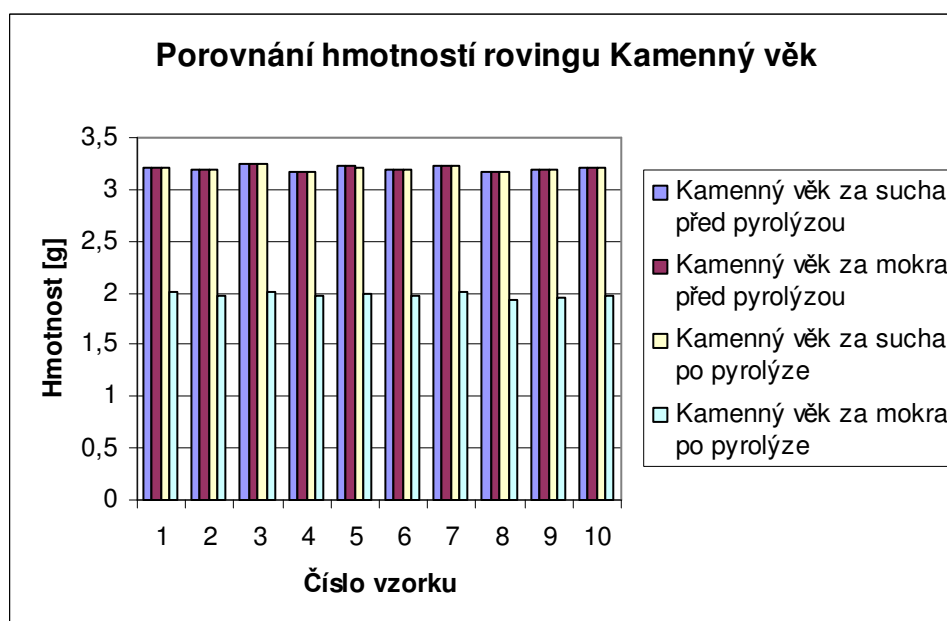
Na obr.18. je graf, který porovnává hmotnosti rovingu Basaltex před a po pyrolýze, který je vážen za sucha a za mokra. Na obr.19. je graf, který porovnává hmotnosti rovingu Kamenný Věk za stejných podmínek jako u obr.18. Na obr.20. je porovnávání hustot Basaltexu a Kamenného Věku před a po pyrolýze.

Z grafu je vidět, že nenastala žádná výrazná změna před pyrolýzou ani po pyrolýze. Můžeme tedy říct, že čedičová vlákna se pyrolýzou nijak nepoškodila a neztratila na své váze.

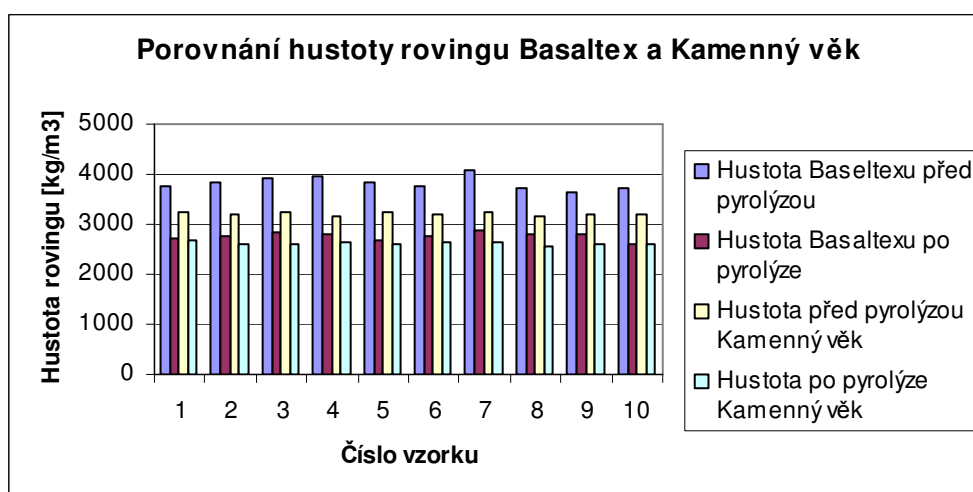
Z grafu je vidět, že vypočítaná hustota se mění před a po pyrolýze.



Obr. 18: Graf – Porovnání hmotnosti rovingu Basaltex



Obr. 19: Graf - Porovnání hmotnosti rovingu Kamenný Věk



Obr. 20: Graf - Porovnání hustoty rovingu Basaltex a Kamenný Věk

7.2 Stanovení jemnosti vlákna

Pro stanovení jemnosti vláken T [tex] bylo použito 50 naměřených hodnot získaných pomocí přístroje Vibroskop 400 [17]. Vibroskop je typ elektronového zařízení pro nedestruktivní stanovení jemnosti elementárních vláken. Vlákná byla zatížena závaží 100 mg, 200 mg a 300 mg. Tímto měřením bylo sledováno jak se změní jemnost vláken při daném zatížení. Výsledky jsou uvedeny v tab. 18 a 19, které jsou v příloze 1.

$$\text{Jemnost vláken} - T \quad T[\text{dtex}] = \frac{\pi}{4} * d^2 * 10^{-12} * \rho * 10^6 \quad [7.2]$$

Ověřily jsme, že působením závaží se jemnost vláken zmenšila. V další části bude porovnání naměřené jemnosti a naměřených průměru a jejich přepočet.

7.2.1 Měření na Vibroskopu 400

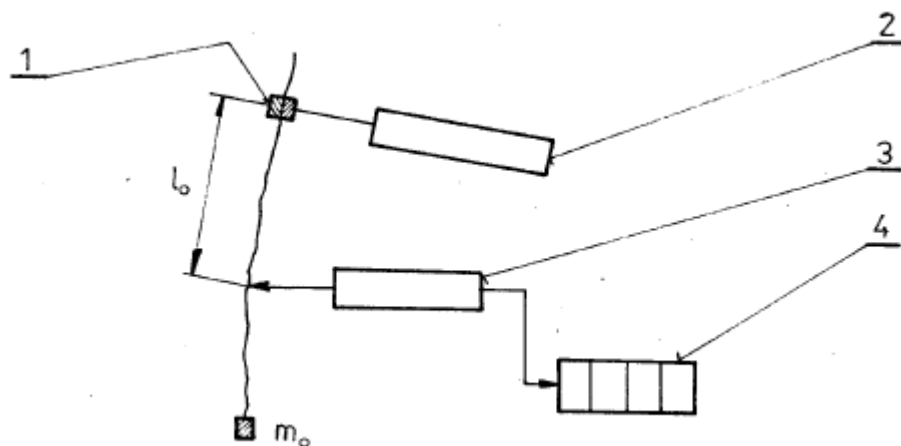
Přístroj pro měření jemnosti VIBROSKOP 400 pracuje na principu vynucených kmitů vláken. Podle frekvence kmitání vlákna a předpětí je automaticky stanovena délková hmotnost (jemnost) vlákna v [dtex]. Přístroj je spojen s dynamometrem VIBRODYN 400, na kterém je možno stanovit pevnost vlákna proměřeného na jemnost. Oba přístroje jsou spojeny s počítačem. Software umožňuje statistické vyhodnocení jemnosti, pevnosti, tažnosti a poměrné pevnosti [cN/tex], [cN/den] zároveň se zobrazením pracovních křivek vláken [17].

Příprava vzorku:

Příprava vláken pro toto měření není nijak náročná. Postačí jenom, aby byla vlákna jednotlivě oddělená od sebe.

Princip měření:

Měření na přístroji probíhá po upnutí předepnutého vlákna do horní čelisti tak, že posunem dolní čelisti spojené se snímačem kmitů se hledá uzlový bod kmitajícího vlákna. Výhodou této metody je snadná obsluha, výsledek měření obdržíme přímo v dtex. Zkouška je nedestruktivní a vlákno můžeme samostatně podrobit dalším zkouškám, např. stanovit pevnost vlákna a přepočítat na poměrnou pevnost v [N/dtex] [12].



Obr. 21: Schéma přístroje Vibroskop 400

Popis obrázku:

- 1 – horní čelist pro upnutí vlákna
- 2 – generátor kmitů
- 3 – snímač kmitů
- 4 – vyhodnocovací člen s displejem (udává přímo jemnost vláken v dtex)

7.3 Stanovení průměru vlákna

Pro stanovení průměru vlákna d [μm] bylo použito 50 naměřených hodnot získaných pomocí obrazové analýzy Lucia G [11] a [12]. Tento systém měří s přesností 0,2 μm . Tímto systémem byla proměřena řada vláken. Naměřené hodnoty průměru byly dále zpracovány dle statistických vztahů. Byla určena střední hodnota \bar{x} , směrodatná odchylka $s(x)$, rozptyl $\sigma^2(x)$, variační koeficient $v(x)$. Výsledky jsou uvedeny v tab. 20 a 21, která je v příloze 3.

Tímto způsobem bylo zjištěno, že vlákna Basaltexu mají průměr vláken kolem 12,48 μm a vlákna Kamenný věk mají průměr kolem 10,6 μm .

7.3.1 Měření pomocí světelného mikroskopu

Světelný mikroskop pracuje se systémem obrazová analýza Lucia G. Lucia G je softwarovým systémem firmy Laboratory Imaging, který zpracovává a analyzuje

barevný i černobílý obraz.

Lucia G rozeznává dva typy základních obrazů, a to binární a barevný. Šedý obraz je speciální případ obrazu barevného.

Do systému obrazové analýzy můžeme vstupovat buď přímo z mikroskopu nebo z fotografie sejmutím prostřednictvím digitální kamery. Obraz v systému je zobrazován pomocí obrazových elementů, tzv. pixelů. Systém je nutno zkalibrovat sejmutím obrazu známé velikosti. Tím se obrazovým elementům přiřazuje skutečná hodnota velikosti strany a plochy.

Měření je zásadní úkol obrazové analýzy. Začíná kalibrací systému Lucia G, následuje kvantitativní vyhodnocení obrazu (volby vhodné statistiky – texturní nebo objektová, výběr příznaků, definování měřicího rámu, masky a obrazů, které mají být zahrnuty do měření) a končí vyhodnocováním a prezentací dat [12].

Vlastní obrazová analýza probíhá podle schématu:

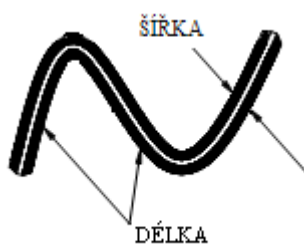
Snímání obrazu \Rightarrow Transformace obrazu \Rightarrow Segmentace obrazu \Rightarrow Vlastní měření

Příprava vzorku:

Vlákna jsou nalepena v papírových rámečkích a položena na podložní sklíčko. Jsou proměřovány jednotlivé rámečky s nalepenými vlákny.

Princip měření:

Stanovení průměru vlákna [μm] je měřením pomyslné úsečky mezi vnějšími okraji vláken viz. obr. 22. Toto je provedeno pomocí obrazové analýzy v systému Lucia G a světelným mikroskopem Nicot Elipse ME 600 s objektivem 100 / 0,95.



Obr.22: Měření průměru vláken

Postup měření:

Pomocí světelného mikroskopu Nikon Elipse byl vytvořen obraz vzorku vláken. Tento obraz byl dále převeden kamerou do digitální polohy, která je vhodná pro zpracování na počítači ve formě LIM, který náleží systému pro zpracování obrazu Lucia G. Formát obsahuje popis obrazu včetně kalibrace a typu objektu.

7.3.2 Měření pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu

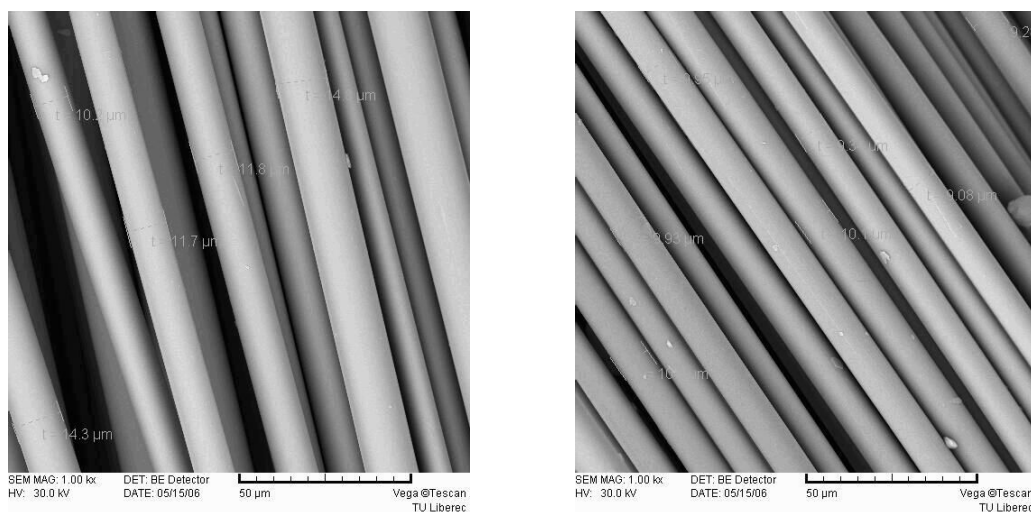
Měření pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu je už popsáno výše v kapitole 5.3.

Příprava vzorku:

Vlákná jsou nalepena na oboustranně lepící pásku, která je nalepena na kovové podložce. Takto nalepená vlákna jsou pozlacena a připravená pro měření v elektronovém rastrovacím mikroskopu

Princip měření:

Stanovení velikosti průměru vlákna [μm] je měřením pomyslných úseček mezi vnějšími okraji vláken jako na obr.23 v levo. Toto je provedeno pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu Vega. Nasnímané obrazy se mohou dále zpracovávat. Na obr.23 jsou nasnímaná podélná čedičová vlákna.



Obr. 23: Podélný pohled čedičovým vláknem Basaltex a Kamenný věk při zvětšení 1000

7.4 Statistické zpracování dat

Data byla zpracována programem QCexpert. Jemnost vláken byla měřena pomocí Vibroskopu 400. Průměry čedičových vláken byly měřeny dvěma způsoby:

- 1) pomocí světelného mikroskopu a obrazové analýzy Lucia G
- 2) pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu Vega.

7.4.1 Výsledky naměřených hodnot a přepočty:

Tab. 14: Vyhodnocené průměr vláken Basaltex

Průměr vlákna Basaltex					
	Lucia G	Vega	Vibroskop		
			100 [mg]	200 [mg]	300 [mg]
průměr	10,96	12,11	9,161	9,013	8,857
směr.odch.	0,67	1,16	0,689	0,687	0,687
rozptyl	0,82	1,08	0,83	0,829	0,829
var.koef	7,47	8,89	9,058	9,199	9,359
Konfidence	0,208	0,446	0,191	0,19	0,19

Tab.15: Vyhodnocené průměr vláken Kamenný věk

Průměr vlákna Kamenný věk					
	Lucia G	Vega	Vibroskop		
			100 [mg]	200 [mg]	300 [mg]
průměr	10,82	9,57	9,508	9,371	9,256
směr.odch.	0,53	0,68	0,486	0,502	0,525
rozptyl	0,73	0,82	0,697	0,708	0,724
var.koef	6,73	8,62	7,331	7,558	0,078
Konfidence	0,164	0,239	0,135	0,139	0,146

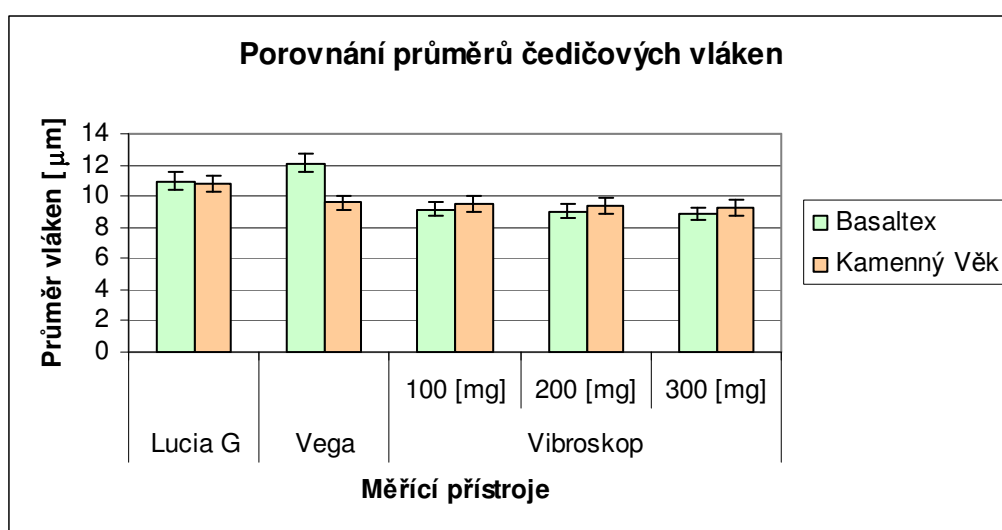
Tab. 16: Vyhodnocené jemnosti vláken Basaltex

Jemnost vlákna Basaltex					
	Lucia G	Vega	Vibroskop		
			100 [mg]	200 [mg]	300 [mg]
průměr	2,65	3,25	1,855	1,796	1,734
směr.odch.	0,32	0,64	0,268	0,266	0,262
rozptyl	0,57	0,8	0,518	0,515	0,511
var.koef	21,39	24,57	27,924	28,696	29,491
Konfidence	0,099	0,246	0,074	0,074	0,073

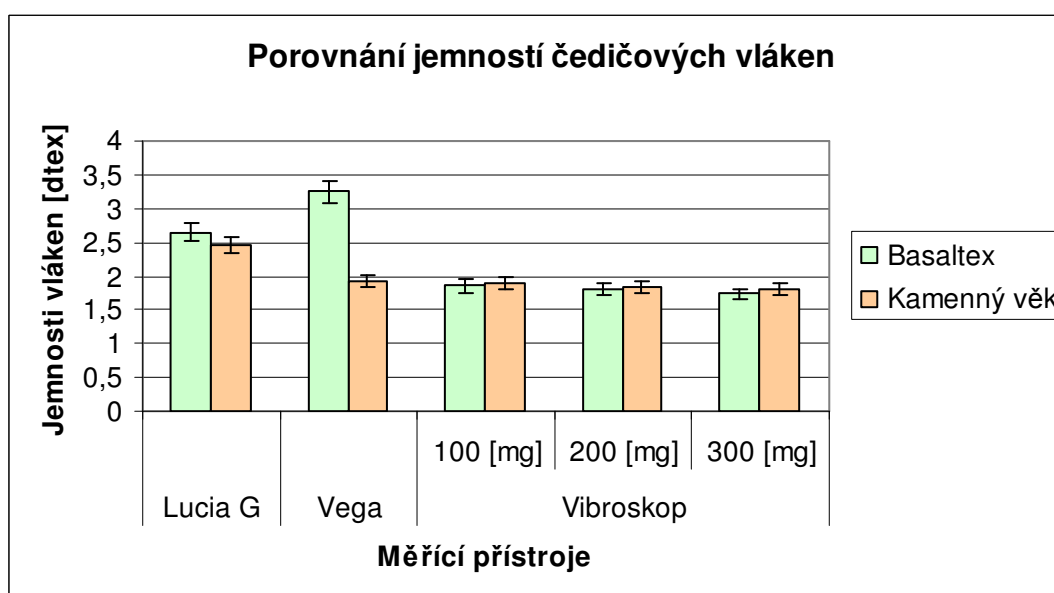
Tab. 17 Vyhodnocené jemnosti vláken Kamenný věk

Jemnost vlákna Kamenný věk					
	Lucia G	Vega	Vibroskop		
			100 [mg]	200 [mg]	300 [mg]
průměr	2,45	1,92	1,892	1,839	1,795
směr.odch.	0,24	0,27	0,192	0,195	0,202
rozptyl	0,49	0,52	0,438	0,442	0,449
var.koef	20,02	27,223	23,128	24,025	25,014
Konfidence	0,074	0,095	0,053	0,054	0,056

7.4.2 Grafy porovnání naměřených hodnot



Obr. 24: Porovnání průměrů čedičových vláken stanovených několika způsoby



Obr. 25: Porovnání jemností čedičových vláken stanovených několika způsoby

7.5 Stanovení pevnosti vlákna tahovou zkouškou

Pro trhání jednotlivých vláken byla použita trhačka TIRA TEST 2300 firmy Labortech [11]. Vzhledem k vlastnostem čedičových vláken, která jsou křehká a jemná, je nutno jednotlivá vlákna nalepit do papírových rámečků, který se po upnutí do čelistí trhačích přístroje přestřihnou. Upínací délka vláken byla 10 mm.

Protože mají čedičová vlákna velmi malý průměr, jsou pouhým okem špatně viditelná. Při přípravě vzorků pro měření byla použita stolní lampy. Velká opatrnost byla věnována manipulaci s vlákny, aby nedošlo k jejich poškození. Výsledky jsou uvedeny v tab. 22 a 23, které jsou v příloze 4.

Princip měření:

Pro trhání jednotlivých vláken byla použita trhačka TIRA TEST 2300 firmy Labortech. Vertikální trhačí přístroj je složen ze dvou čelistí, z nichž spodní čelist je pevná a horní posuvná. Výhodou je připojení k počítači, kde je instalován software LabTest v.3., který naměřené hodnoty automaticky zpracovává.

Vzorek vlákna v papírovém rámečku byl upnut do čelistí přístroje a velmi opatrně přestřiženy strany rámečku, aby nedošlo k poškození nebo porušení vlákna. Na počítači byly pomocí ovládacího programu zvoleny rychlost posuvu čelistí a další parametry nutné pro provoz přístroje. Na monitoru počítače byla pozorována pracovní křivka tahové zkoušky.

Program vyhodnotil pevnost, tažnost i modul pružnosti u zkoušených vzorků. Podle dodatečného proměření průměrů vláken na obrazové analýze Lucia G byly hodnoty pevnosti a modulu pružnosti konkrétních vláken přepočítány.

$$\text{Modul v tahu – E} \quad E[\text{GPa}] = \frac{\frac{4F[N]}{\pi * d^2[\mu\text{m}]} * \rho[\text{kg} / \text{m}^3]}{10^9} \quad [7.5.1.]$$

$$\text{Poměrná pevnost – F} \quad F[\text{N/tex}] = \frac{F_{\text{max}}[N]}{T[\text{dtex}]} \quad [7.5.2.]$$

Tímto způsobem bylo zjištěno, že pevnost vláken se pohybuje okolo 1 N/tex.

8 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a realizovat experiment pro zjišťování termomechanických vlastností kompozitních materiálů s čedičovou výztuží. Byly také zkoumány čedičová vlákna ve formě rovingu dodána z Belgie (Basaltex) a Ruska (Kamenný věk).

U těchto vláken, ve formě rovingu, byly nejprve zjišťovány měrné hmotnosti (hustota), dále byl roving pyrolyzován do 700°C a byl zjišťován úbytek hmotnosti rovingu. Vlákná Basaltex neměly úbytek hmotnosti, ale vlákna Kamenný věk z tmavly a nastal u nich nepatrný úbytek hmotnosti. Při pyrolýze došlo k uvolnění některých chemických prvků.

Byly také určovány jemnosti čedičových vláken na přístroji Vibroskop 400. Také byly určovány průměry čedičových vláken na světelném mikroskopu s obrazovou analýzou Lucia G a na elektronovém rastrovacím mikroskopu s programem Vega. Tyto měření byly navzájem porovnány. Z jemností se vypočítal průměr a z průměru jemnost vláken. Tyto přepočty se mohly provést po zjištění měrné hmotnosti vláken.

Nejpřesnějším měřením byl způsob zjištění průměru čedičových vláken na obrazové analýze Lucia G. Byly zde provedeny konfidenční intervaly, které vykazovaly stejné hodnoty u obrazové analýzy Lucia G a u přepočtených jemností na průměr na přístroji Vibroskop 400.

Měření pomocí termomechanického analyzátoru byly zjištěny hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti, které jsou uvedeny v příloze 6.

Na přístroji TMA CX03R (termomechanický analyzátor) se proměřovaly jednotlivé kompozity. K měření bylo použito pět kompozitů, které byly pyrolyzovány za různých teplot a jeden z kompozitů nebyl pyrolyzován. Kompozity byly nařezány na 5 mm kvádříky a byly namáhány na vzpěr i na podélný směr do teploty 600°C.

Kompozit, který nebyl pyrolyzován, se po měření změnila jeho struktura, byly vidět jak v kompozitu nastaly praskliny, způsobené vypálením matrice. Kompozit, který byl pyrolyzován na 600°C, se v jeho struktuře objevily jen nepatrné praskliny, způsobené asi tím, že kompozit nebyl pyrolyzován přesně na teplotu 600°C. Kompozit, který byl pyrolyzován na 700°C až 900°C, nenastala žádná rapidní změna v jeho struktuře.

Průběh měření změny výšky vzorků v závislosti na teplotě ve fázi ohřevu a chlazení dokumentuje obr. 12. Číselné hodnoty této změny jsou uvedeny pro jednotlivé

typy kompozitů v tabulce 7.

Hodnoty změny výšky vzorku při izotermickém ohřevu jsou na obr. 15. Průměrné hodnoty této změny jsou vypočtené a přehledně uvedeny v tabulce 6. Dále pak v příloze 7, kde jsou uvedené hodnoty pro jednotlivé kompozity.

Pro výpočet koeficientu teplotní roztažnosti v závislosti na teplotě pro jednotlivé typy kompozitů bylo použito spojitých závislostí, získaných ve vyhodnocovacím programu TMA Grapher. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny přehledně v příloze 7.

Z výsledků je možno usoudit, že čedičová vlákna mají převážně technické využití. Výsledky měření umožňují využití vláken v izolační technice, kde je izolace namáhána teplotně a chemicky. Např. pro výrobu rohoží, různých filtrů, stavebních hmot, atd.

Čedičová vlákna nacházejí široké uplatnění v textilním průmyslu i vzhledem k problémům, mezi které patří např. nízká odolnost vůči oděru, nízká tažnost, obtížná barvitelnost a prakticky zanedbatelná nasákavost.

Čedičová vlákna nacházejí široké uplatnění jako nehořlavé textilie, tapety a tepelně izolační textilie. Podle dosavadních znalostí vědy, čedičový materiál je při běžném styku zdravotně nezávadný. Ze základního materiálu se samovolně neuvolňují žádné škodlivé látky. Při jejich likvidaci není potřebné žádná zvláštní opatření a je možno bez rizika skladovat.

Kompozitní materiál se dá dobře tvarovat a má rozměrovou variabilitu, je pevný, tuhý, samozhašující. Hygienicky nezávadný, tepelně izolační, chemicky a mechanicky odolný. Má nízké náklady na údržbu a nízké pořizovací náklady na výrobní nářadí.

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Agarwal B. D., Broutman L. J.: Vláknové kompozity, SNTL, Praha 1987
- [2] Bareš R. A.: Kompozitní materiály, SNTL, Praha 1988
- [3] Košková B.: Struktura a vlastnosti vláken, TU v Liberci, Liberec 1989
- [4] Kulíšková G.: Diplomová práce, Tepelné vlastnosti vlákenných kompozitů s keramickou maticí, KTM, TU v Liberci, Liberec 2004
- [5] Lehner J., Skleněná, horninová a strusková vlákna, SNTL, Praha 1960
- [6] Lehner J., Surý L.: Silikátová vlákna, SNTL, Praha 1975
- [7] Militký J.: Speciální vlákna, skripta, TU v Liberci, Liberec 2004

- [8] Militký J.: Textilní vlákna, skripta, TU v Liberci, Liberec 2002
- [9] Strakošová V.: Diplomová práce, Vliv zákrutů na dynamické mechanické charakteristiky PA hedvábí, KTM, TU v Liberci, Liberec 2003
- [10] Zeisbergerová J.: Diplomová práce, Chemická degradace čedičových vláken, KTM, TU v Liberci, Liberec 2003
- [11] Labor Tech 2.010, Trhačka
- [12] Lucia, Uživatelské příručka, Laboratory Imaging, 2001
- [13] Přesná pila, ISOMETTM 1000 přesná pila, Instrukce pro provoz a údržbu
- [14] Rastrovací elektronový mikroskop Vega TS 5130, Technický popis a návod k obsluze, Tescan, s.r.o., Brno
- [15] Švejka R.: Uživatelská příručka TMA Grapher, Termomechanický analyzátor TMA CX03R, R. M. I., 1993
- [16] Švejka R.: Software pro termomechanickou analýzu, R. M. I., 1993
- [17] Vibroskop 400, Příručka pro uživatele, Instruction manual, Lenzing technik
- [18] www.basaltex.cz
- [19] www.ft.vslib.cz
- [20] www.oa.svitavy.cz
- [21] www.museum.mineral.cz
- [22] www.natur.cuni.cz
- [23] www.mineralz.net
- [24] <http://cz.wikipedia.org>
- [25] www.quido.cz
- [26] www.isomet.cz

SEZNAM PŘÍLOH

- | | |
|-----------|--|
| Příloha 1 | Stanovení jemnosti vláken pomocí Vibroskopu 400 |
| Příloha 2 | Stanovení hustoty rovinku vážením |
| Příloha 3 | Stanovení průměru vláken světelným mikroskopem |
| Příloha 4 | Stanovení pevností vláken tahovou zkouškou |
| Příloha 5 | Grafické závislosti pevnosti z trhacího přístroje vlákna Basaltex |
| Příloha 6 | Grafické závislosti pevnosti z trhacího přístroje vlákna Kamenný věk |

Příloha 7 Měření vlastností kompozitu s čedičovou výztuží pomocí TMA

Příloha 8 Měření na elektronovém rastrovacím mikroskopu

Příloha 1

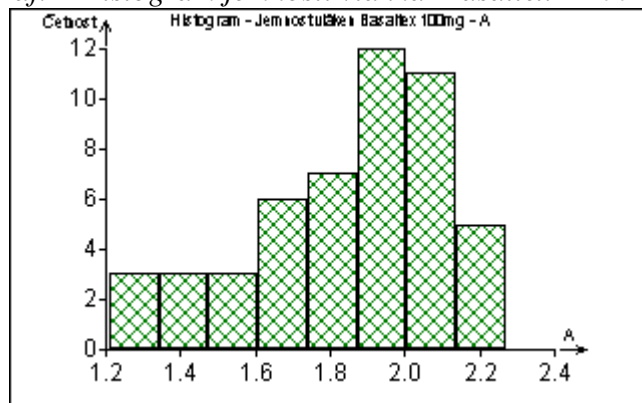
Stanovení jemnosti vláken pomocí Vibroskopu 400

Tab. 18: Naměřené hodnoty jemností vlákna Basaltex

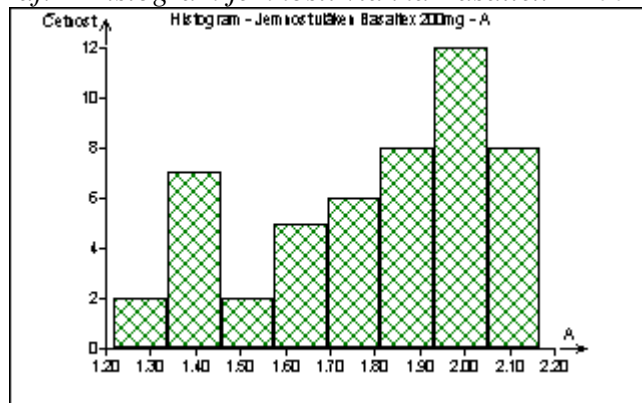
Basaltex						
	100mg		200mg		300mg	
	Jemnost [dtex]	Průměr[μm]	Jemnost [dtex]	Průměr[μm]	Jemnost [dtex]	Průměr[μm]
1	1,73	8,87	1,62	8,59	1,49	8,23
2	2,27	10,16	2,17	9,94	2	9,54
3	1,98	9,49	1,78	9,00	1,76	8,95
4	2	9,54	1,9	9,30	1,7	8,79
5	2,13	9,84	2,06	9,68	2,02	9,59
6	1,39	7,95	1,35	7,84	1,32	7,75
7	1,77	8,97	1,43	8,07	1,41	8,01
8	1,96	9,44	1,74	8,90	1,52	8,32
9	1,82	9,10	1,58	8,48	1,53	8,34
10	1,69	8,77	1,63	8,61	1,61	8,56
11	1,67	8,72	1,63	8,61	1,6	8,53
12	1,73	8,87	1,68	8,74	1,64	8,64
13	2,01	9,56	1,83	9,12	1,69	8,77
14	1,87	9,22	1,8	9,05	1,72	8,85
15	1,9	9,30	1,87	9,22	1,83	9,12
16	1,97	9,47	1,95	9,42	1,83	9,12
17	2,06	9,68	1,99	9,52	1,91	9,32
18	2,07	9,70	2	9,54	1,94	9,39
19	1,56	8,42	1,51	8,29	1,49	8,23
20	1,61	8,56	1,53	8,34	1,51	8,29
21	1,86	9,20	1,8	9,05	1,72	8,85
22	2,27	10,16	2,13	9,84	2,12	9,82
23	2,16	9,91	2,12	9,82	2,06	9,68
24	1,21	7,42	2,17	9,94	2,12	9,82
25	1,48	8,21	1,36	7,87	1,35	7,84
26	2,14	9,87	2,11	9,80	2,06	9,68
27	2,05	9,66	1,99	9,52	1,87	9,22
28	1,66	8,69	1,44	8,09	1,35	7,84
29	1,39	7,95	1,36	7,87	1,29	7,66
30	1,54	8,37	1,42	8,04	1,24	7,51
31	1,41	8,01	1,36	7,87	1,35	7,84
32	1,31	7,72	1,25	7,54	1,24	7,51
33	1,98	9,49	1,97	9,47	1,91	9,32
34	1,96	9,44	1,94	9,39	1,91	9,32
35	2,11	9,80	1,98	9,49	1,92	9,35
36	2,18	9,96	2,14	9,87	2,12	9,82
37	1,79	9,02	1,77	8,97	1,76	8,95

38	1,26	7,57	1,22	7,45	1,21	7,42
39	2,05	9,66	2	9,54	1,94	9,39
40	1,96	9,44	1,93	9,37	1,91	9,32
41	1,98	9,49	1,87	9,22	1,85	9,17
42	1,94	9,39	1,9	9,30	1,83	9,12
43	2,07	9,70	2,04	9,63	1,97	9,47
44	1,97	9,47	1,95	9,42	1,92	9,35
45	2,06	9,68	1,98	9,49	1,9	9,30
46	1,93	9,37	1,88	9,25	1,86	9,20
47	2,07	9,70	2,02	9,59	1,97	9,47
48	1,87	9,22	1,83	9,12	1,76	8,95
49	1,79	9,02	1,74	8,90	1,7	8,79
50	2,11	9,80	2,06	9,68	1,99	9,52
n	50	50	50	50	50	50
x	1,86	9,16	1,80	9,01	1,73	8,86
s2	0,27	0,69	0,27	0,69	0,26	0,69
s	0,52	0,83	0,52	0,83	0,51	0,83
v	27,92	9,06	28,70	9,20	29,49	9,36
min	1,21	7,42	1,22	7,45	1,21	7,42
max	2,27	10,16	2,17	9,94	2,12	9,82

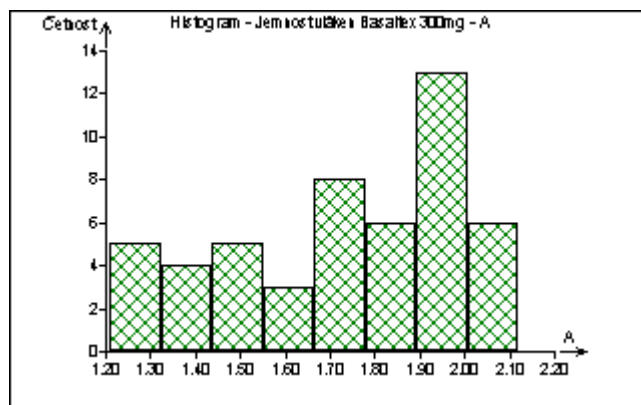
Graf. 1 Histogram jemností vlákna Basaltex – 100 mg



Graf. 2 Histogram jemností vlákna Basaltex – 200 mg



Graf. 3 Histogram jemností vlákna Basaltex – 300 mg

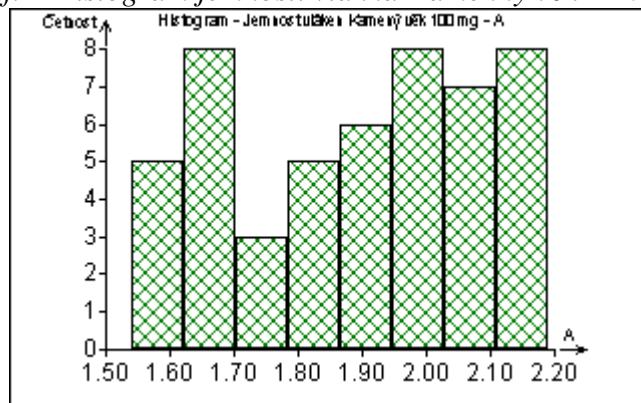


Tab. 19: Naměřené hodnoty jemností vlákna Kamenný věk

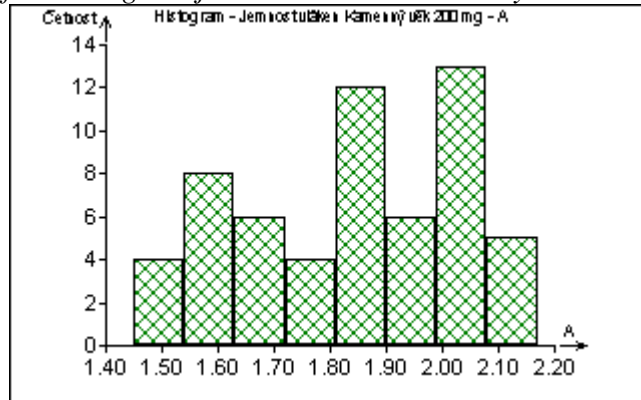
Kamenný věk						
	100mg		200mg		300mg	
	Jemnost [dtex]	Průměr[μm]	Jemnost [dtex]	Průměr[μm]	Jemnost [dtex]	Průměr[μm]
1	2,04	9,88	2,02	9,84	1,96	9,69
2	2,01	9,81	1,99	9,76	1,97	9,71
3	2,13	10,10	2,05	9,91	2,01	9,81
4	2,1	10,03	2,03	9,86	1,96	9,69
5	1,87	9,46	1,84	9,39	1,82	9,34
6	1,98	9,74	1,86	9,44	1,82	9,34
7	2,06	9,93	1,83	9,36	1,77	9,21
8	2,14	10,12	2,01	9,81	1,98	9,74
9	1,89	9,51	1,76	9,18	1,74	9,13
10	1,97	9,71	1,82	9,34	1,78	9,23
11	1,76	9,18	1,73	9,10	1,6	8,75
12	1,64	8,86	1,61	8,78	1,58	8,70
13	2,09	10,00	2,06	9,93	2,02	9,84
14	1,68	8,97	1,45	8,33	1,4	8,19
15	1,6	8,75	1,53	8,56	1,44	8,30
16	1,99	9,76	1,9	9,54	1,86	9,44
17	1,93	9,61	1,91	9,56	1,87	9,46
18	1,85	9,41	1,84	9,39	1,81	9,31
19	1,65	8,89	1,63	8,84	1,61	8,78
20	1,83	9,36	1,76	9,18	1,68	8,97
21	1,76	9,18	1,62	8,81	1,59	8,73
22	1,99	9,76	1,95	9,66	1,83	9,36
23	2,01	9,81	1,99	9,76	1,92	9,59
24	1,88	9,49	1,85	9,41	1,83	9,36
25	2,06	9,93	2,04	9,88	2,01	9,81
26	2,11	10,05	2,05	9,91	1,99	9,76
27	1,67	8,94	1,65	8,89	1,5	8,48
28	1,56	8,64	1,54	8,59	1,48	8,42
29	1,54	8,59	1,51	8,50	1,47	8,39
30	2,16	10,17	2,15	10,15	2,14	10,12
31	1,7	9,02	1,63	8,84	1,56	8,64
32	1,6	8,75	1,57	8,67	1,55	8,62
33	1,72	9,08	1,69	9,00	1,65	8,89
34	1,7	9,02	1,66	8,92	1,64	8,86
35	1,63	8,84	1,61	8,78	1,58	8,70
36	1,82	9,34	1,73	9,10	1,63	8,84

37	1,96	9,69	1,9	9,54	1,87	9,46
38	1,61	8,78	1,58	8,70	1,56	8,64
39	1,66	8,92	1,64	8,86	1,63	8,84
40	2,09	10,00	2,02	9,84	1,93	9,61
41	2,02	9,84	2	9,79	1,96	9,69
42	1,84	9,39	1,82	9,34	1,81	9,31
43	2,12	10,08	2,09	10,00	2,04	9,88
44	2,08	9,98	2,05	9,91	2,03	9,86
45	1,86	9,44	1,85	9,41	1,83	9,36
46	2,19	10,24	2,17	10,19	2,14	10,12
47	2,17	10,19	2,15	10,15	2,12	10,08
48	1,9	9,54	1,87	9,46	1,85	9,41
49	1,89	9,51	1,86	9,44	1,84	9,39
50	2,11	10,05	2,08	9,98	2,07	9,96
n	50	50	50	50	50	50
x	1,892	9,508	1,839	9,371	1,795	9,256
s2	0,192	0,486	0,195	0,502	0,202	0,525
s	0,438	0,697	0,442	0,708	0,449	0,724
v	23,128	7,331	24,025	7,558	25,014	0,078
min	1,540	8,588	1,450	8,333	1,400	8,188
max	2,190	10,241	2,170	10,194	2,140	10,124

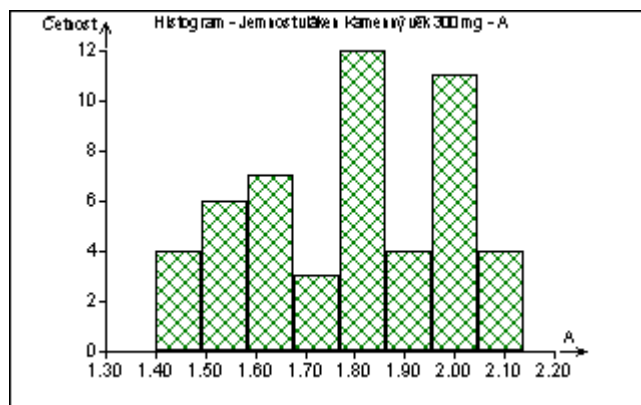
Graf. 4 Histogram jemností vlákna Kamenný věk – 100 mg



Graf. 5 Histogram jemností vlákna Kamenný věk – 200 mg



Graf. 6 Histogram jemností vlákna Kamenný věk – 300 mg



Příloha 2

Stanovení hustoty rovingu vážením

Tab. 8: Naměřené hodnoty hmotností rovingu Basaltex

Basaltex				
vzorek	A	B	C	ρ [kg/m³]
2	3,8734	2,5219	3,873	2866
3	3,7626	2,4365	3,7625	2837
4	3,6507	2,3638	3,6507	2837
5	4,0521	2,6174	4,052	2824
6	3,7323	2,4107	3,7321	2824
x	3,8142	2,4701	3,8141	2838
s2	0,1551	0,1004	0,155	17
s	0,3938	0,3169	0,3938	4
v	10,3247	12,8294	10,3237	0

Tab.9: Naměřené hodnoty hmotností rovingu Kamenný věk

Kamenný věk				
vzorek	A	B	C	ρ
2	3,2522	2,0356	3,2517	2673
3	3,2094	2,0208	3,2081	2700
4	3,1482	1,9701	3,1477	2672
5	3,2162	2,0295	3,2177	2710
6	3,2038	2,0107	3,2034	2685
x	3,206	2,0133	3,2057	2688
s2	0,0374	0,0259	0,0375	17
s	0,1934	0,161	0,1937	4
v	6,0324	7,9977	6,0434	0

Vzorec pro výpočet hustoty rovingu:

$$\rho = \frac{A}{(A - B)} * 1000$$

A – hmotnost pevné látky (rovingu) na vzduchu [g]

B – hmotnost pevné látky (rovingu) v destilované vodě [g]

C – hmotnost pevné látky (rovingu) po vysušení [g]

ρ_{vody} - hustota destilované vody při teplotě 22 °C - 1000 [kg/m³]

ρ - hustota pevné látky (rovingu) [kg/m³]

7.1.2 Stanovení hustoty rovingu vážením – před pyrolýzou

Tab. 10: Naměřené hodnoty hmotností rovingu Basaltex – před pyrolýzou

Basaltex				
vzorek	hmotnost [g]			ρ [kg/m ³]
	a	b	c	
1	3,7676	3,7769	-0,0093	3758
2	3,8461	3,8541	-0,008	3838
3	3,9173	3,927	-0,0097	3908
4	3,9528	3,9633	-0,0105	3942
5	3,8566	3,8636	-0,007	3850
6	3,7557	3,7651	-0,0094	3746
7	4,0996	4,1095	-0,0099	4090
8	3,7125	3,7221	-0,0096	3703
9	3,6453	3,6524	-0,0071	3638
10	3,729	3,738	-0,009	3720
průměr	3,82825	3,8372	-0,00895	3819

Tab. 11: Naměřené hodnoty hmotností rovingu Kamenný věk – před pyrolýzou

Kamenný věk				
vzorek	hmotnost [g]			ρ [kg/m ³]
	a	b	c	
1	3,2183	3,2149	0,0034	3222
2	3,1874	3,1842	0,0032	3191
3	3,2478	3,2447	0,0031	3251
4	3,1767	3,1742	0,0025	3179
5	3,223	3,2205	0,0025	3226
6	3,1903	3,1883	0,002	3192
7	3,2341	3,2318	0,0023	3236
8	3,1741	3,1722	0,0019	3176
9	3,1839	3,1815	0,0024	3186
10	3,214	3,2113	0,0027	3217
průměr	3,20496	3,20236	0,0026	3208

Vzorec pro výpočet hustoty rovingu:

$$\rho = \frac{a}{(a-b)} * 1000$$

a – hmotnost pevné látky (rovingu) před pyrolýzou [g]

b – hmotnost pevné látky (rovingu) po pyrolýze [g]

c – rozdíl hmotnosti pevné látky (rovingu) před a po pyrolýze [g]

ρ - hustota pevné látky (rovingu) [kg/m³]

Příloha 3

Stanovení průměru vláken světelným mikroskopem

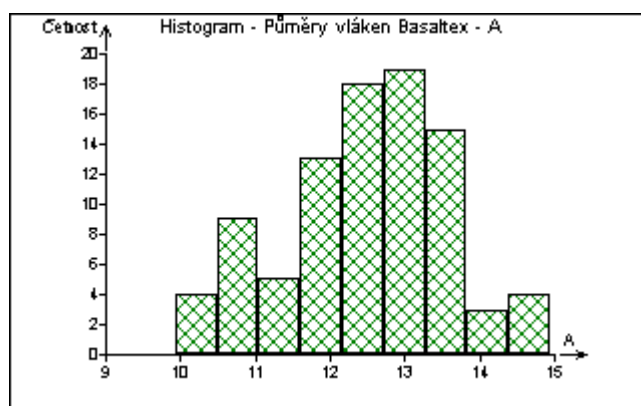
Tab. 20: Naměřené hodnoty průměrů vlákna Basaltex

Basaltex		
	Průměr [μm]	Jemnost [tex]
1	12,14	3,24
2	12,31	3,33
3	13,34	3,91
4	13,34	3,91
5	12,57	3,47
6	12,08	3,21
7	13,44	3,97
8	12,79	3,60
9	12,92	3,67
10	12,94	3,68
11	13,57	4,05
12	12,46	3,41
13	13,6	4,07
14	12,58	3,48
15	11,62	2,97
16	12,26	3,30
17	12,61	3,50
18	12,9	3,66
19	12,92	3,67
20	10,92	2,62
21	10,59	2,47
22	10,26	2,31
23	13,27	3,87
24	13,27	3,87
25	13,24	3,85
26	13,24	3,85
27	10,92	2,62
28	10,96	2,64
29	10,61	2,47
30	9,98	2,19
31	10,02	2,21
32	9,93	2,17
33	10,94	2,63

34	11,91	3,12
35	13,3	3,89
36	11,66	2,99
37	10,67	2,50
38	11,1	2,71
39	13,27	3,87
40	13,58	4,05
41	12,9	3,66
42	13,25	3,86
43	13,24	3,85
44	13,27	3,87
45	12,64	3,51
46	12,31	3,33
47	13,3	3,89
48	12,36	3,36
49	11,33	2,82
50	11,59	2,95
51	11,91	3,12
52	11,95	3,14
53	12,59	3,48
54	11,91	3,12
55	11,7	3,01
56	13,18	3,82
57	14,62	4,70
58	12,96	3,69
59	11,65	2,98
60	11,34	2,83
61	12,63	3,51
62	12,31	3,33
63	12,63	3,51
64	13,29	3,88
65	13,29	3,88
66	14,29	4,49
67	12,62	3,50
68	13,96	4,28
69	11,63	2,97
70	12,3	3,33
71	14,3	4,49
72	13,63	4,08
73	13,29	3,88
74	10,63	2,48
75	10,97	2,65
76	14,95	4,91
77	13,63	4,08
78	12,96	3,69
79	13,29	3,88
80	12,96	3,69
81	12,97	3,70
82	11,37	2,84
83	14,63	4,70
84	11,63	2,97
85	12	3,17

86	14,62	4,70
87	12,31	3,33
88	12,3	3,33
89	12,29	3,32
90	13,29	3,88
x	12,48	3,45
s2	1,12	0,61
s	1,06	0,78
v	8,48	22,59
min	9,93	2,17
max	14,95	4,91

Graf. 7: Histogram průměrů vlákna Basaltex ze světelného mikroskopu

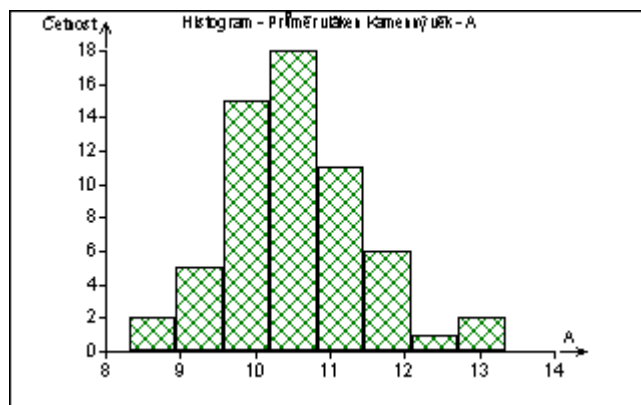


Tab. 21: Naměřené hodnoty průměru vlákna Kamenný věk

Kamenný věk		
	Průměr [μm]	Jemnost [tex]
1	11,65	2,83
2	10,97	2,51
3	11,34	2,69
4	10,98	2,52
5	11,31	2,67
6	13,95	4,06
7	9,63	1,94
8	9,63	1,94
9	8,97	1,68
10	10,1	2,13
11	10,1	2,13
12	13,35	3,72
13	12,64	3,34
14	13,29	3,69
15	10,63	2,36
16	10,76	2,42
17	9,97	2,08
18	10,02	2,10
19	11,34	2,69
20	10,3	2,22

21	11,14	2,59
22	10,01	2,09
23	11,7	2,86
24	9,97	2,08
25	10,71	2,40
26	10,68	2,38
27	8,99	1,69
28	9,64	1,94
29	10,3	2,22
30	9,97	2,08
31	10,64	2,36
32	10,38	2,25
33	10,05	2,11
34	9,99	2,08
35	9,66	1,95
36	10,38	2,25
37	8,31	1,44
38	8,98	1,68
39	9,07	1,72
40	8,64	1,56
41	10,71	2,40
42	11,3	2,67
43	10,3	2,22
44	11,63	2,82
45	11,37	2,70
46	10,64	2,36
47	10,3	2,22
48	10,3	2,22
49	10,65	2,37
50	11,65	2,83
51	9,97	2,08
52	11,14	2,59
53	10,3	2,22
54	11,3	2,67
55	10,63	2,36
56	9,31	1,81
57	11,53	2,78
58	11,63	2,82
59	9,78	2,00
60	10,97	2,51
61	10,81	2,44
x	10,60	2,37
s ²	1,08	0,50
s	1,04	0,71
v	9,82	29,77
min	8,31	1,44
max	13,95	4,06

Graf. 8: Histogram průměrů vlákna Kamenný věk ze světelného mikroskopu



Příloha 4

Stanovení pevností vláken tahovou zkouškou

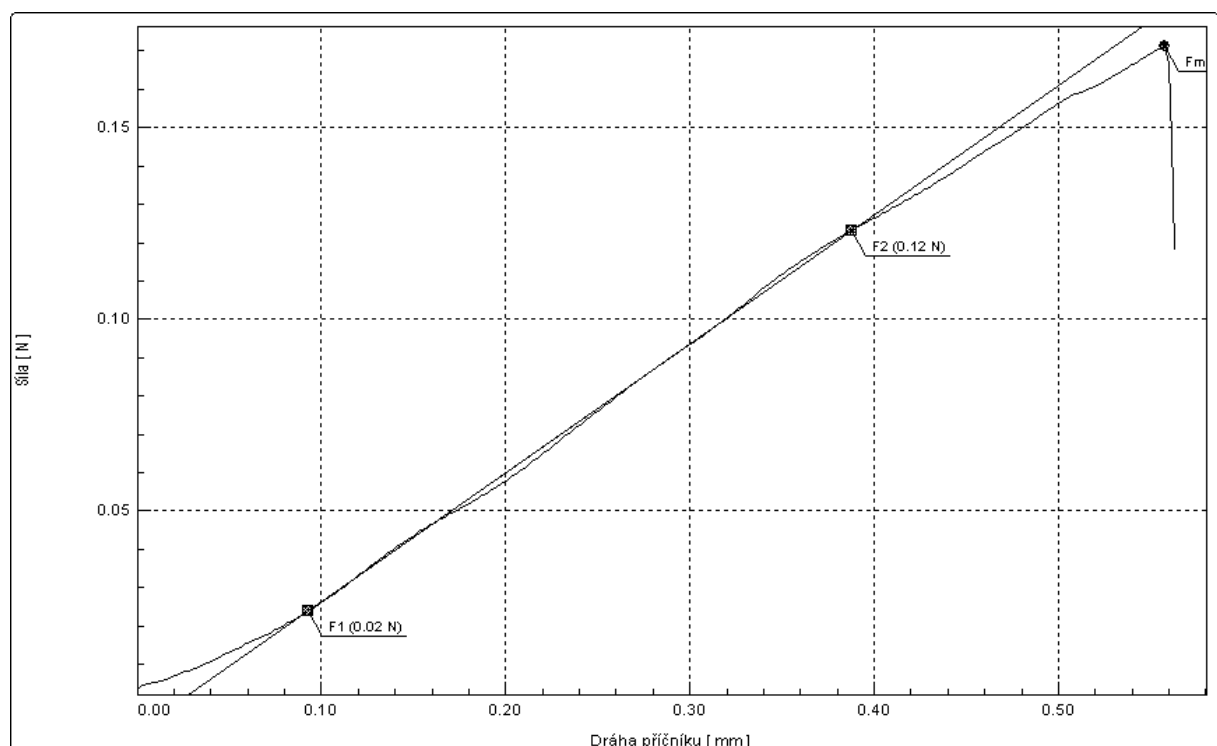
Tab. 22: Naměřené hodnoty pevnosti vlákna Basaltex

Zkouška	E [MPa]	Amax [%]	Fmax [N]	d [μm]	T [dtex]	F [N/tex]	E [GPa]
1	9,43	5,58	0,3	12,14	0,31	0,97	2,59
2	8,95	2,68	0,18	12,31	0,32	0,57	1,51
3	8,86	4,42	0,24	13,34	0,37	0,65	1,72
4	7,35	5,57	0,25	13,34	0,37	0,67	1,79
5	7,23	5,3	0,25	12,57	0,33	0,76	2,02
6	9,25	6,77	0,35	12,08	0,30	1,15	3,06
7	7,92	2,14	0,15	13,44	0,38	0,40	1,06
8	8,1	4,4	0,26	12,79	0,34	0,76	2,02
9	7,68	6,26	0,35	12,92	0,35	1,00	2,67
10	9,38	4,76	0,29	12,94	0,35	0,83	2,21
11	7,55	6,61	0,29	13,57	0,38	0,75	2,01
12	7	5,31	0,28	12,46	0,32	0,86	2,30
13	8,21	5,05	0,26	13,6	0,39	0,67	1,79
14	6,01	4,77	0,17	12,58	0,33	0,51	1,37
15	6,29	5,76	0,23	11,62	0,28	0,82	2,17
16	6,96	4,21	0,24	12,26	0,31	0,76	2,03
17	7,91	4,54	0,28	12,61	0,33	0,84	2,24
18	5,13	3,63	0,14	12,9	0,35	0,40	1,07
19	4,69	4,28	0,13	12,92	0,35	0,37	0,99
20	4,95	4,39	0,17	10,92	0,25	0,68	1,82
21	7,93	3,43	0,23	10,59	0,23	0,98	2,61
22	8,36	7,61	0,22	10,26	0,22	1,00	2,66
23	7,96	4,9	0,32	13,27	0,37	0,87	2,31
24	6,71	5,07	0,27	13,27	0,37	0,73	1,95
25	4,78	13,15	0,15	13,24	0,37	0,41	1,09
26	4,64	4,92	0,15	13,24	0,37	0,41	1,09
27	4,22	4,06	0,16	10,92	0,25	0,64	1,71
28	4,79	3,29	0,15	10,96	0,25	0,60	1,59
29	5,07	3,93	0,17	10,61	0,24	0,72	1,92
30	5,1	4,23	0,18	9,98	0,21	0,87	2,30
31	4,48	4,66	0,17	10,02	0,21	0,81	2,16
32	7,87	4,66	0,33	9,93	0,21	1,60	4,26
33	8,25	5,78	0,36	10,94	0,25	1,44	3,83

34	4,29	5,58	0,17	11,91	0,30	0,57	1,53
35	4,95	4,98	0,2	13,3	0,37	0,54	1,44
36	5,24	4,63	0,2	11,66	0,28	0,70	1,87
37	8,24	3,32	0,24	10,67	0,24	1,01	2,69
38	6,85	5,79	0,35	11,1	0,26	1,36	3,62
39	6,56	3,33	0,21	13,27	0,37	0,57	1,52
40	7,58	6,38	0,3	13,58	0,39	0,78	2,07
41	7,84	4	0,27	12,9	0,35	0,78	2,07
42	6,7	5,25	0,31	13,25	0,37	0,85	2,25
43	6,41	5,91	0,31	13,24	0,37	0,85	2,25
44	7,62	5,15	0,3	13,27	0,37	0,82	2,17
45	7,64	3	0,18	12,64	0,33	0,54	1,44
46	7,25	2,32	0,15	12,31	0,32	0,47	1,26
47	6,1	4,69	0,24	13,3	0,37	0,65	1,73
48	6,85	3	0,15	12,36	0,32	0,47	1,25
49	6,61	3,03	0,18	11,33	0,27	0,67	1,79
50	7,43	5,13	0,23	11,59	0,28	0,82	2,18
51	6,58	5,68	0,3	11,91	0,30	1,01	2,69
52	6,25	3,48	0,18	11,95	0,30	0,60	1,61
53	5,83	4,39	0,21	12,59	0,33	0,63	1,69
54	6,75	7,65	0,22	11,91	0,30	0,74	1,98
55	6,39	4,34	0,22	11,7	0,29	0,77	2,05
56	6,64	6,43	0,33	13,18	0,36	0,91	2,42
57	9,98	4,28	0,29	14,62	0,45	0,65	1,73
58	7,45	5,29	0,25	12,96	0,35	0,71	1,90
59	5,47	5,15	0,22	11,65	0,28	0,78	2,06
60	5,77	6,04	0,22	11,34	0,27	0,82	2,18
61	6,89	4,64	0,25	12,63	0,33	0,75	2,00
62	5,93	5,47	0,27	12,31	0,32	0,85	2,27
63	6,19	5,89	0,24	12,63	0,33	0,72	1,92
64	8,72	5,56	0,39	13,29	0,37	1,06	2,81
65	8,62	3,79	0,19	13,29	0,37	0,52	1,37
66	7,5	5,11	0,3	14,29	0,43	0,70	1,87
67	7,41	5,51	0,3	12,62	0,33	0,90	2,40
68	7,78	3,71	0,19	13,96	0,41	0,47	1,24
69	7,66	6,55	0,27	11,63	0,28	0,96	2,54
70	8,93	5,24	0,25	12,3	0,32	0,79	2,11
71	5,67	5,47	0,23	14,3	0,43	0,54	1,43
72	5,8	5,23	0,2	13,63	0,39	0,52	1,37
73	10,95	5,45	0,43	13,29	0,37	1,17	3,10
74	10,11	3,74	0,3	10,63	0,24	1,27	3,38
75	10,2	6,47	0,48	10,97	0,25	1,91	5,08
76	7,93	4,09	0,31	14,95	0,47	0,66	1,77
77	12,17	6,42	0,51	13,63	0,39	1,31	3,50
78	6,67	4,88	0,28	12,96	0,35	0,80	2,12
79	7,48	6,93	0,36	13,29	0,37	0,98	2,60
80	11,57	8,74	0,53	12,96	0,35	1,51	4,02
81	8,78	6,35	0,53	12,97	0,35	1,51	4,01
82	6,84	4,56	0,27	11,37	0,27	1,00	2,66
84	5,84	6,32	0,24	11,63	0,28	0,85	2,26
85	10,83	6,89	0,47	12	0,30	1,56	4,16
87	7,23	7,16	0,32	12,31	0,32	1,01	2,69

88	9,48	3,9	0,27	12,3	0,32	0,85	2,27
89	7,56	5,48	0,3	12,29	0,32	0,95	2,53
90	9,1	2,22	0,18	13,29	0,37	0,49	1,30
91	8,56	5,42	0,28	14,6	0,45	0,63	1,67
x	7,29	5,07	0,26	12,45	0,33	0,82	2,18
s2	1,676495	1,529448	0,086988	1,101231	0,056548	0,294288	0,782806
s	1,294795	1,236709	0,294937	1,049395	0,237799	0,542483	0,884763
v	17,76481	24,37647	112,9493	8,426597	72,86845	66,26441	40,62931
min	4,22	2,14	0,13	9,93	0,21	0,37	0,99
max	12,17	13,15	0,53	14,95	0,47	1,91	5,08

Graf. 9 Závislost pevnosti na délce vlákna Basaltex



Grafické závislosti pevností z trhacího přístroje pro vlákna Basaltex jsou uvedeny v příloze 5.

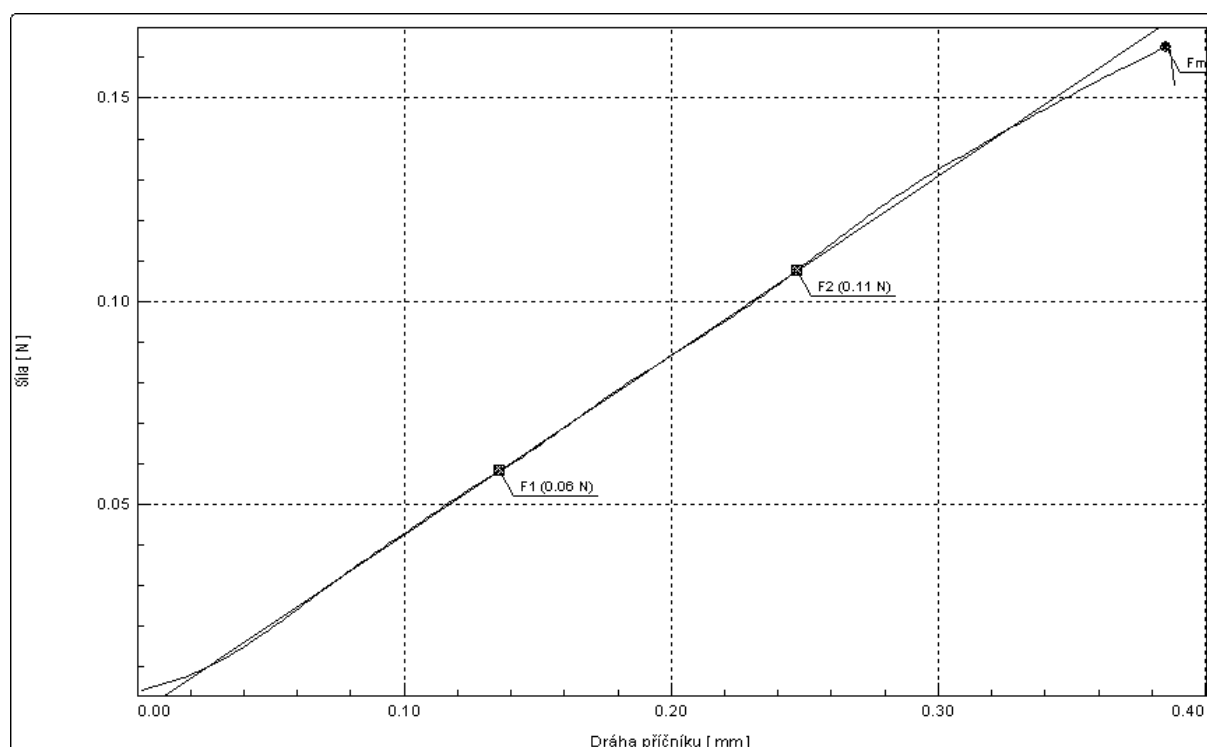
Tab. 23: Naměřené hodnoty pevnosti vlákna Kamenný věk

Zkouška	E [MPa]	Amax [%]	Fmax [N]	d [μ m]	T [dtex]	F [N/tex]	E [GPa]
1	4,71	6,4	0,23	11,65	0,28	0,81	2,16
2	4,43	3,85	0,16	10,97	0,25	0,64	1,69
3	4,23	3,23	0,14	11,34	0,27	0,52	1,39
4	4,46	5,02	0,21	10,98	0,25	0,83	2,22
5	4,04	4,86	0,18	11,31	0,27	0,67	1,79
6	4,93	5,32	0,2	13,95	0,41	0,49	1,31
7	3,59	3,6	0,13	9,63	0,19	0,67	1,79
8	3,32	5,37	0,16	9,63	0,19	0,83	2,20

9	3,67	3,24	0,11	8,97	0,17	0,65	1,74
10	3,55	3,93	0,13	10,1	0,21	0,61	1,62
11	3,14	4,59	0,14	10,1	0,21	0,66	1,75
12	7,29	4,99	0,32	13,35	0,37	0,86	2,29
13	7,14	3,6	0,24	12,64	0,33	0,72	1,91
14	5,48	6,62	0,34	13,29	0,37	0,92	2,45
15	4,2	3,42	0,13	10,63	0,24	0,55	1,47
16	4,89	4,85	0,22	10,76	0,24	0,91	2,42
17	3,82	6,21	0,23	9,97	0,21	1,11	2,95
18	4,32	6,38	0,2	10,02	0,21	0,95	2,54
19	3,99	5,34	0,21	11,34	0,27	0,78	2,08
20	4,9	5,69	0,25	10,3	0,22	1,13	3,00
21	5,58	4,38	0,22	11,14	0,26	0,85	2,26
22	5,47	6,52	0,29	10,01	0,21	1,39	3,69
23	5,99	6,11	0,3	11,7	0,29	1,05	2,79
24	3,6	4,91	0,17	9,97	0,21	0,82	2,18
25	3,91	8,63	0,21	10,71	0,24	0,88	2,33
26	3,5	4,39	0,16	10,68	0,24	0,67	1,79
27	3,51	5	0,18	8,99	0,17	1,07	2,84
28	3,49	3,58	0,13	9,64	0,19	0,67	1,78
29	4,05	6,29	0,22	10,3	0,22	0,99	2,64
30	4,62	6,11	0,24	9,97	0,21	1,16	3,08
31	4,02	5,34	0,2	10,64	0,24	0,85	2,25
32	3,65	3,88	0,12	10,38	0,22	0,53	1,42
33	4,22	4,51	0,18	10,05	0,21	0,85	2,27
34	4,01	4,52	0,17	9,99	0,21	0,82	2,17
35	4,09	4,05	0,15	9,66	0,19	0,77	2,05
36	4,56	5,54	0,23	10,38	0,22	1,02	2,72
37	3,05	4,72	0,14	8,31	0,14	0,97	2,58
38	3,02	5,17	0,14	8,98	0,17	0,83	2,21
39	3,25	5,28	0,14	9,07	0,17	0,82	2,17
40	3,07	4,82	0,14	8,64	0,16	0,90	2,39
41	3,67	5,45	0,16	10,71	0,24	0,67	1,78
42	5,45	5,64	0,27	11,3	0,27	1,01	2,69
43	5,53	5,59	0,24	10,3	0,22	1,08	2,88
44	5,44	4,82	0,22	11,63	0,28	0,78	2,07
45	5,57	4,69	0,24	11,37	0,27	0,89	2,36
46	4,4	7,06	0,25	10,64	0,24	1,06	2,81
47	4,86	4,26	0,19	10,3	0,22	0,86	2,28
48	5,55	3,73	0,16	10,3	0,22	0,72	1,92
49	5,16	3,78	0,15	10,65	0,24	0,63	1,68
50	6,6	4,96	0,25	11,65	0,28	0,88	2,35
51	5,86	2,44	0,15	9,97	0,21	0,72	1,92
52	5,64	6,91	0,33	11,14	0,26	1,27	3,39
53	5,11	6,07	0,25	10,3	0,22	1,13	3,00
54	5,25	5,87	0,25	11,3	0,27	0,94	2,49
55	5,74	3,49	0,15	10,63	0,24	0,64	1,69
56	5,45	6,67	0,26	9,31	0,18	1,44	3,82
57	10,93	4,89	0,5	11,53	0,28	1,80	4,79
58	6,08	5,68	0,26	11,63	0,28	0,92	2,45
59	5,04	4,27	0,18	9,78	0,20	0,90	2,40
60	5,06	4,62	0,21	10,97	0,25	0,84	2,22

61	5,44	9,11	0,29	10,81	0,24	1,19	3,16
x	4,73	5,09	0,21	10,60	0,24	0,88	2,34
s2	1,29	1,25	0,07	1,08	0,05	0,24	0,63
s	1,14	1,12	0,26	1,04	0,22	0,49	0,79
v	24,04	21,97	126,01	9,82	94,15	55,30	33,91
min	3,02	2,44	0,11	8,31	0,14	0,49	1,31
max	10,93	9,11	0,5	13,95	0,41	1,80	4,79

Graf. 10 Závislost pevnosti na délce vlákna Kamenný věk

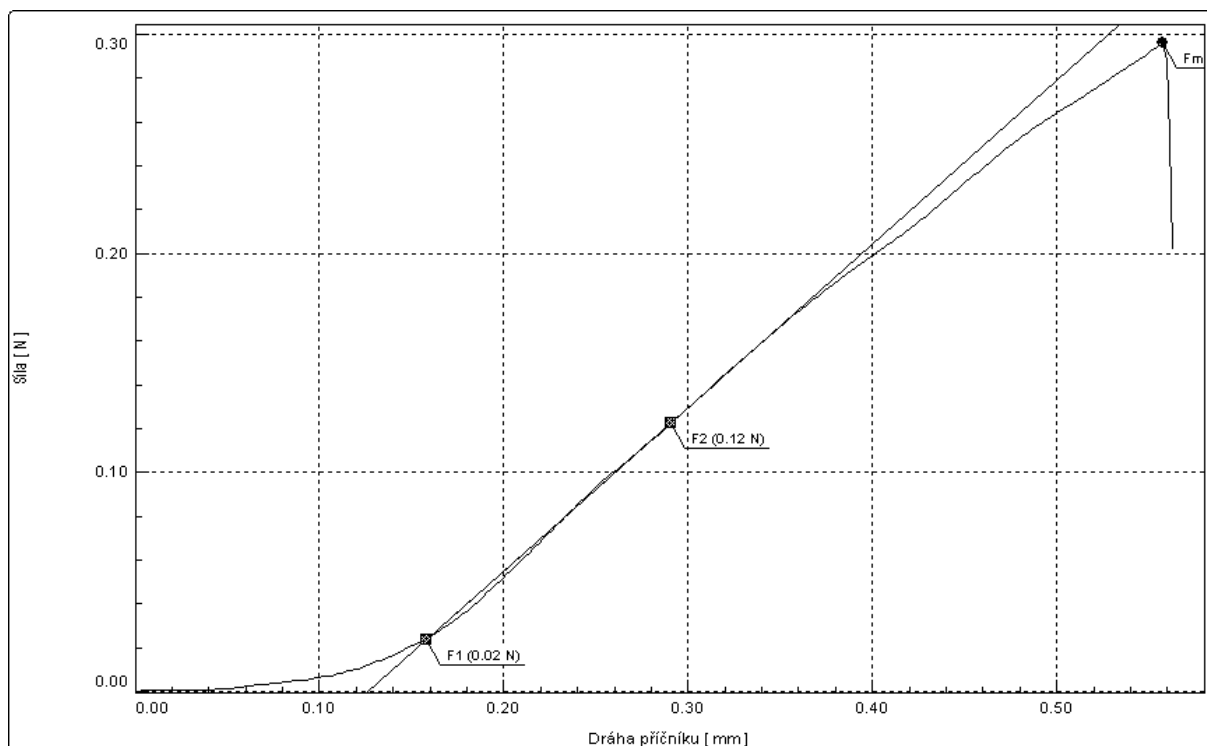


Grafické závislosti pevností z trhačního přístroje pro vlákna Kamenný věk jsou uvedeny v příloze 6.

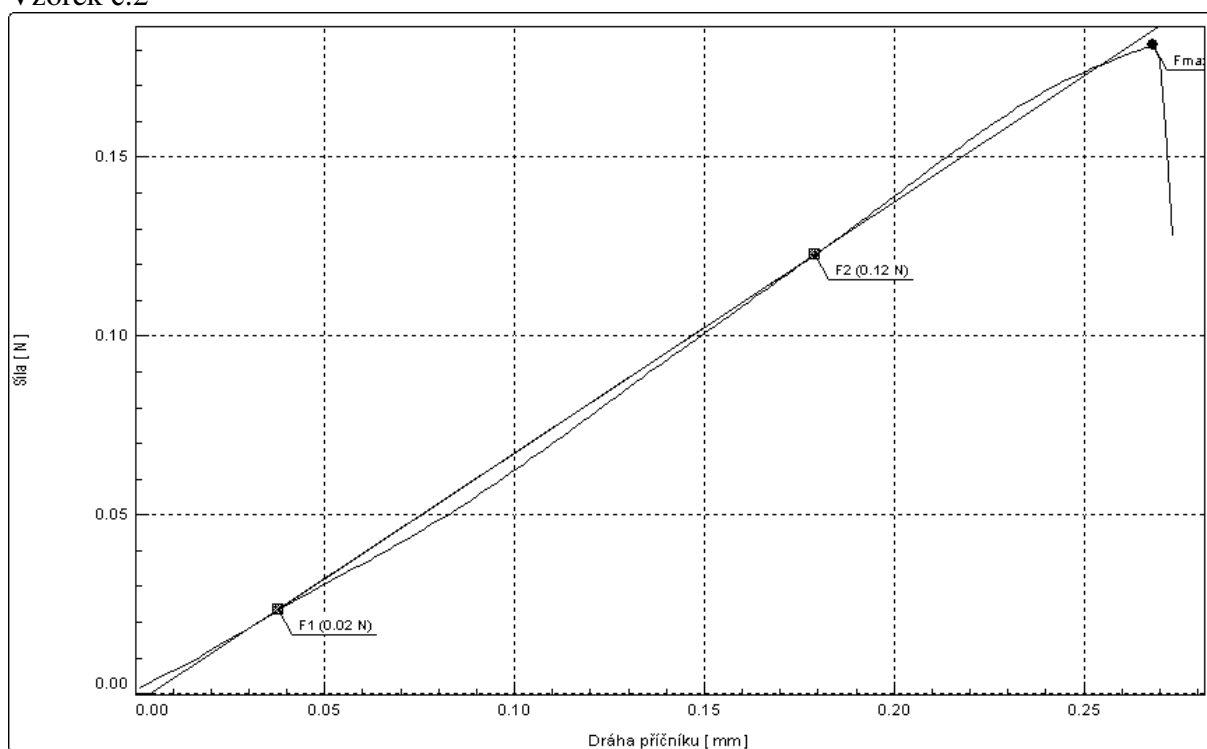
Grafické závislosti pevností z trhačního přístroje

Vlákno Basaltex

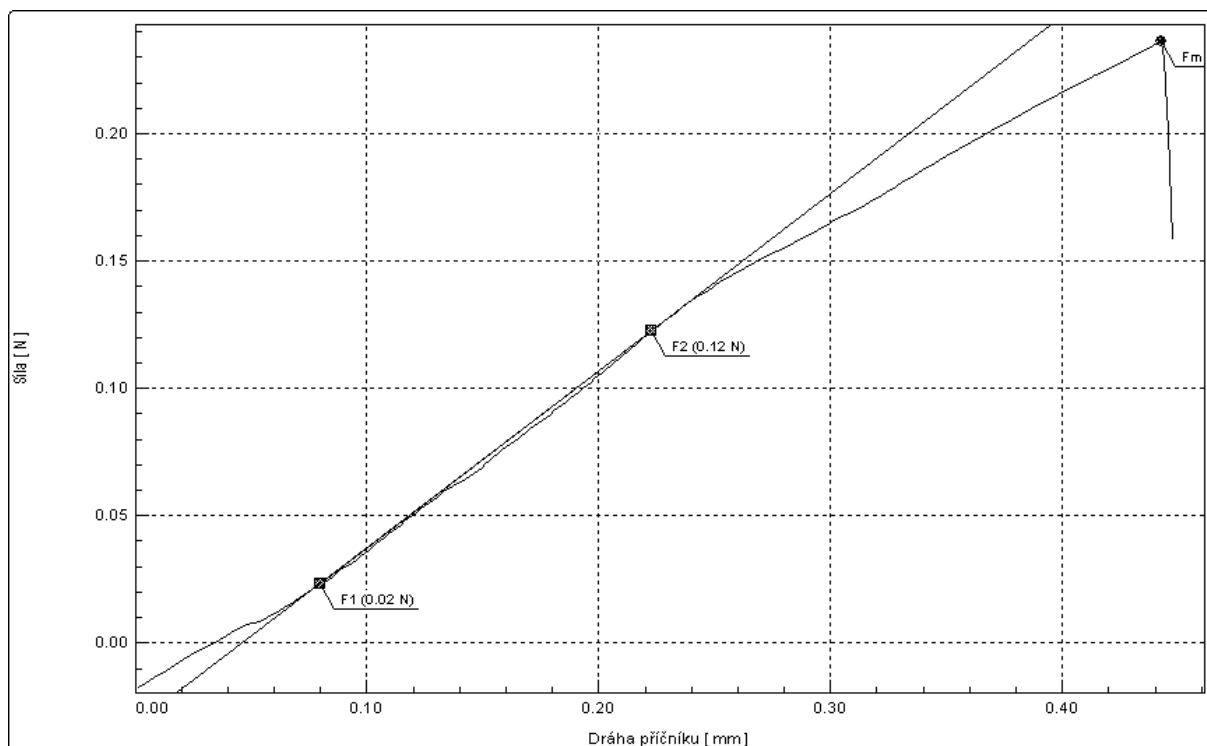
Vzorek č.1



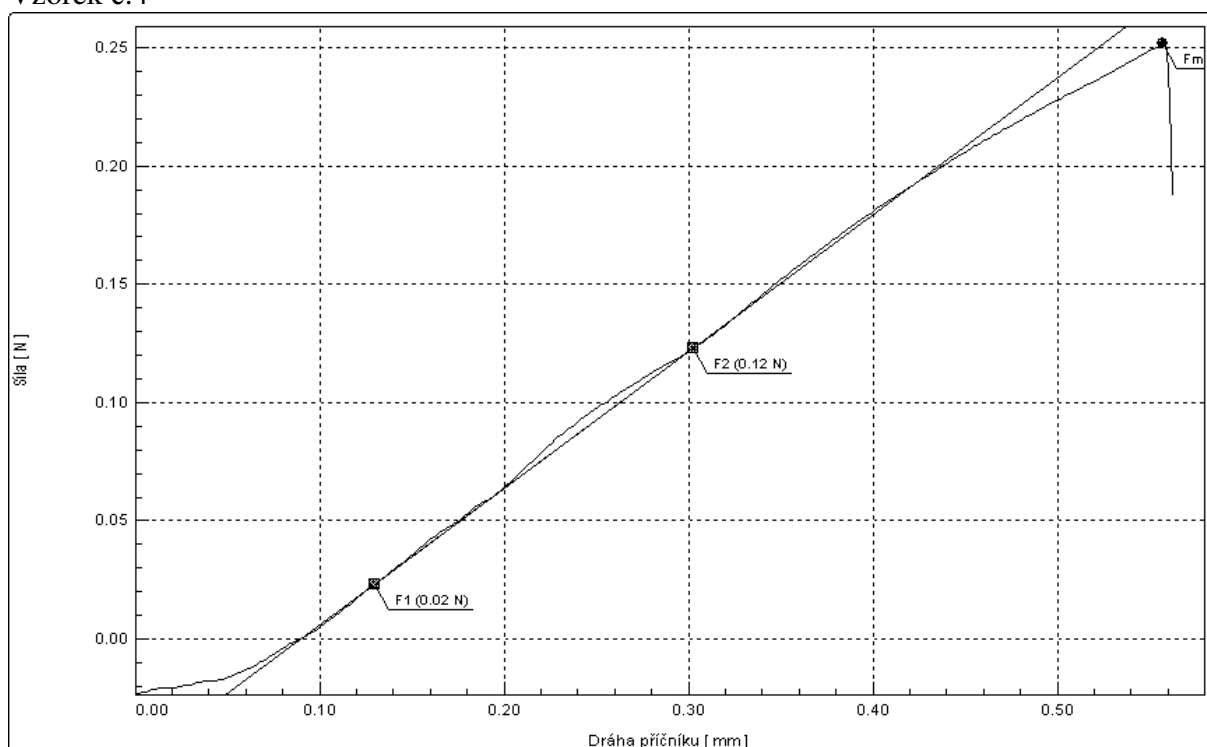
Vzorek č.2



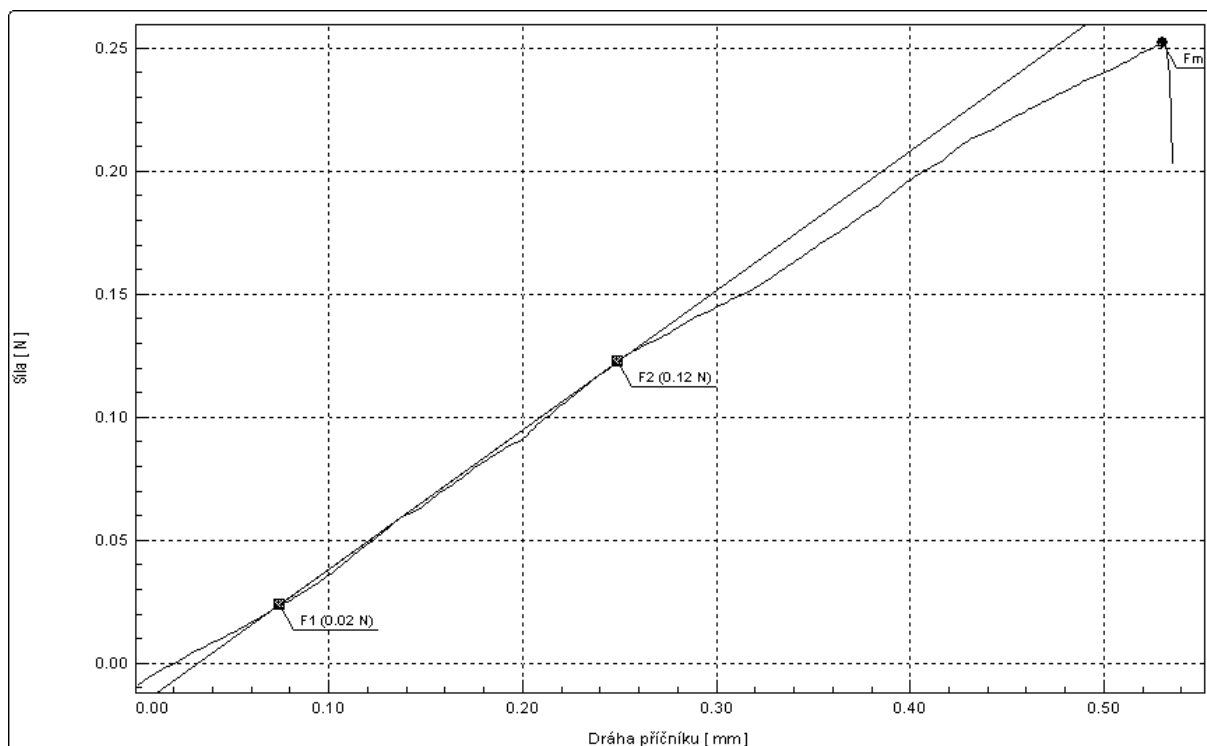
Vzorek č.3



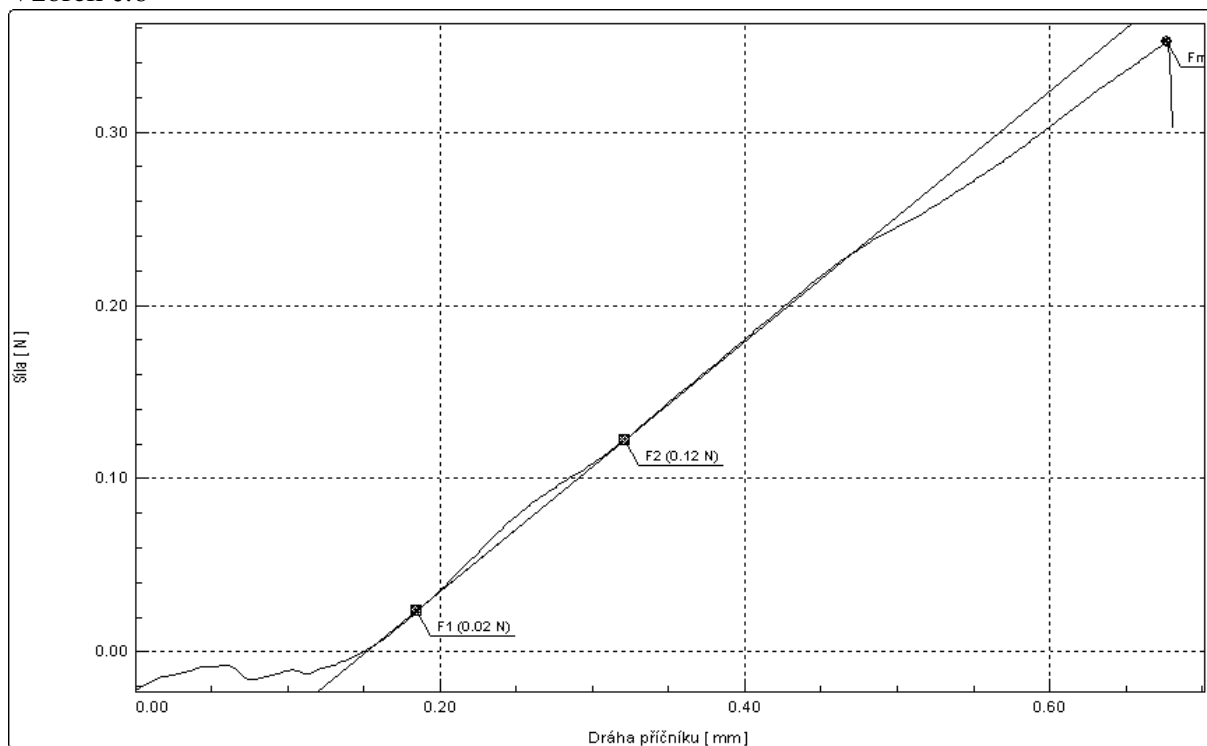
Vzorek č.4



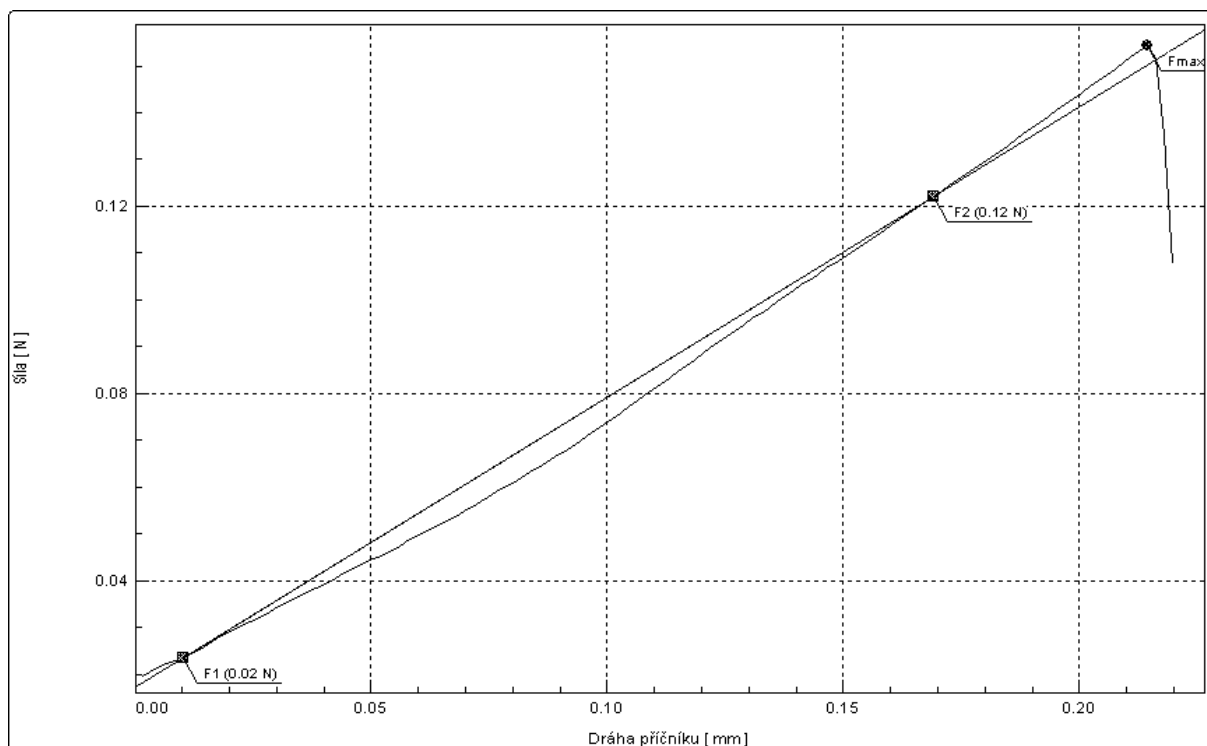
Vzorek č.5



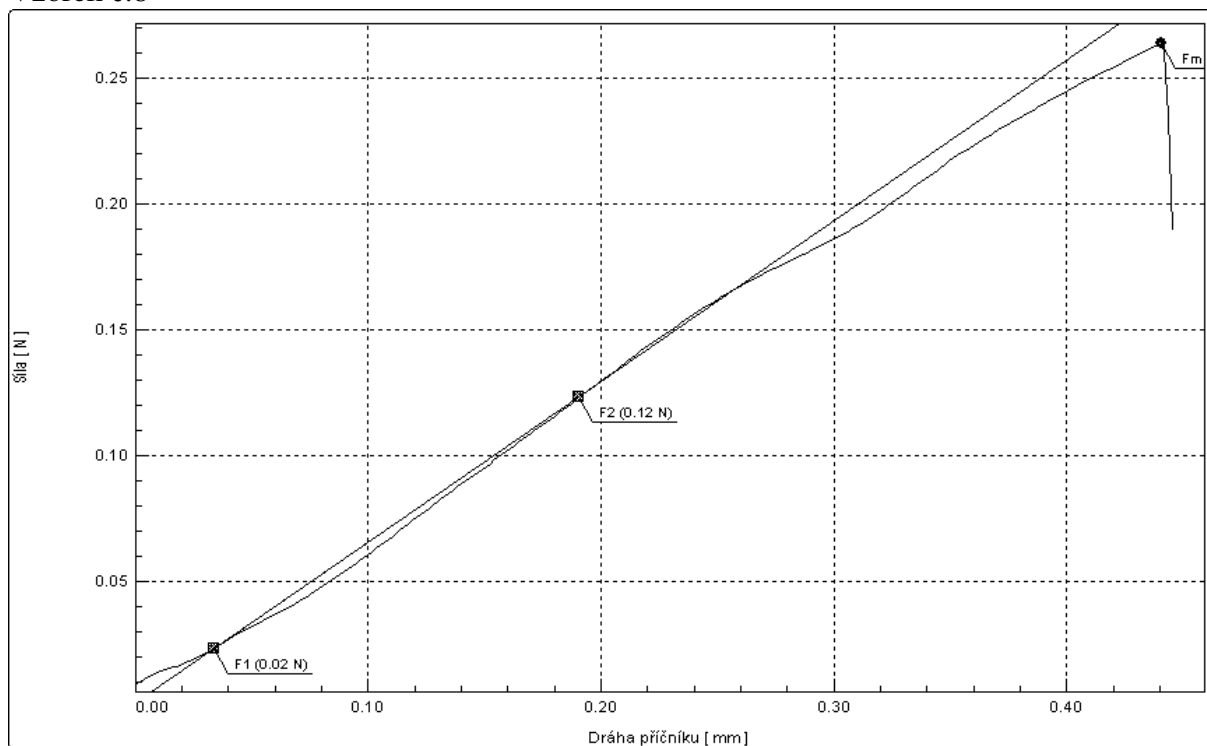
Vzorek č.6



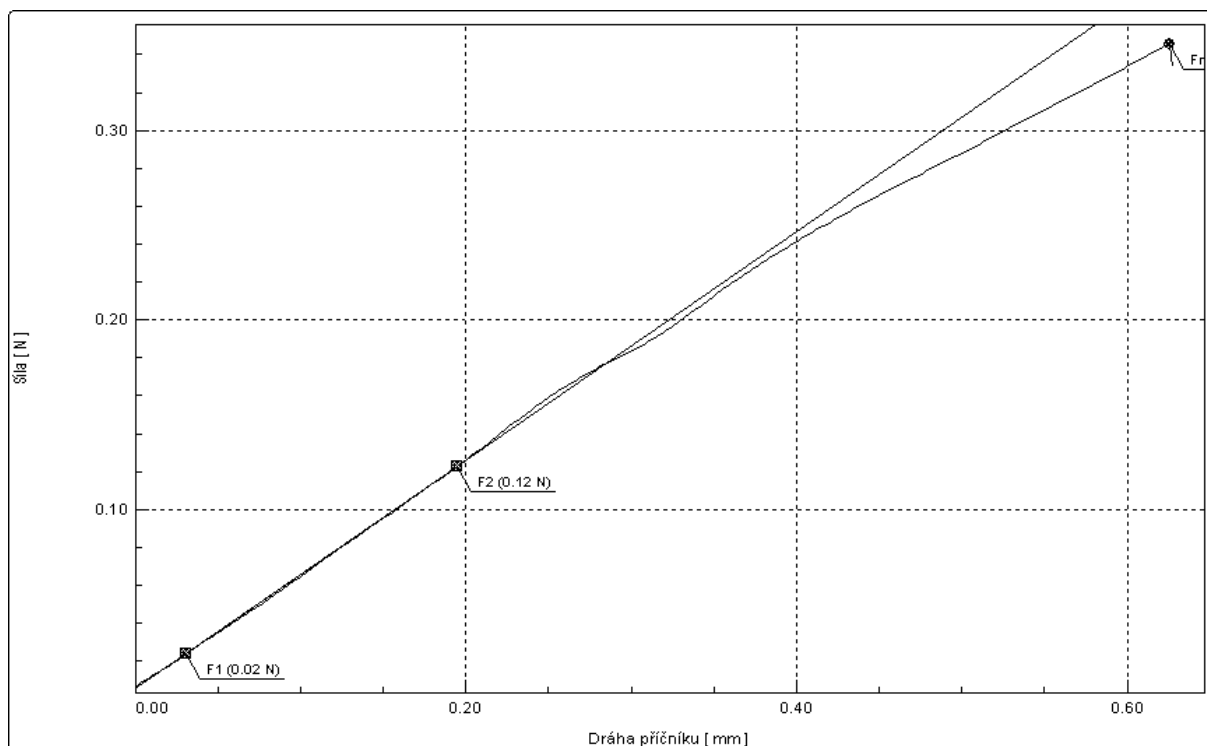
Vzorek č.7



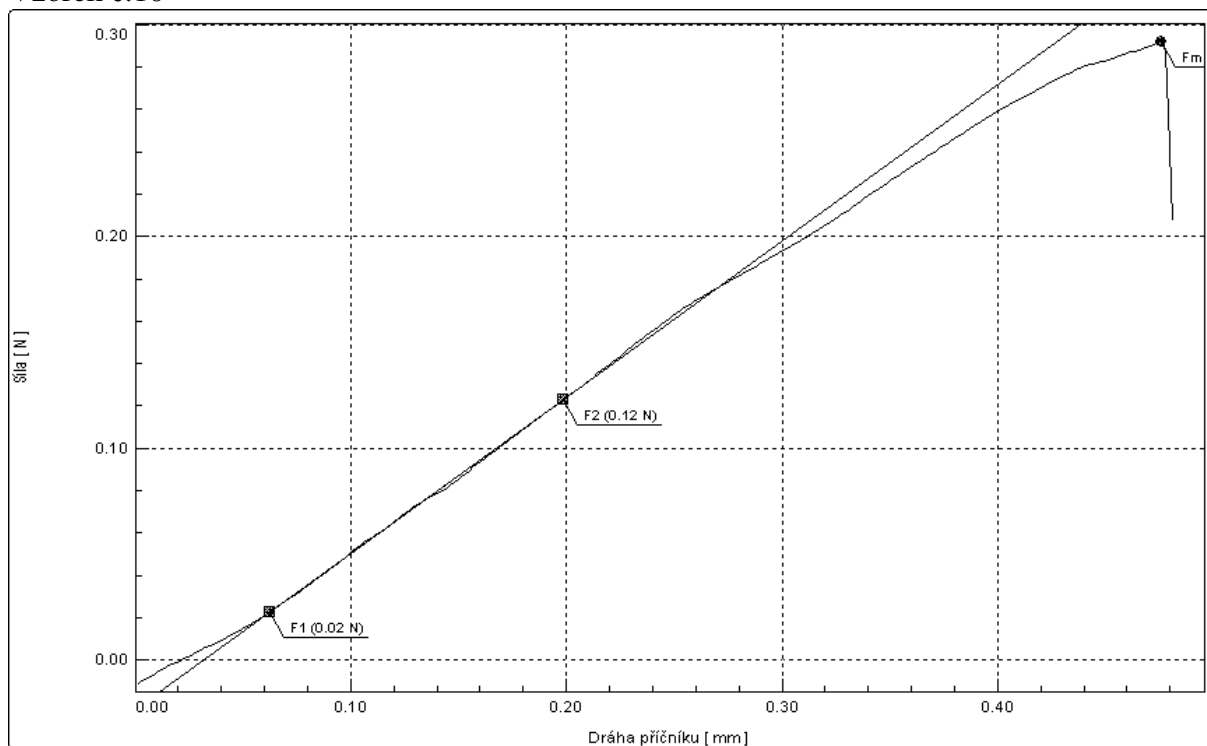
Vzorek č.8



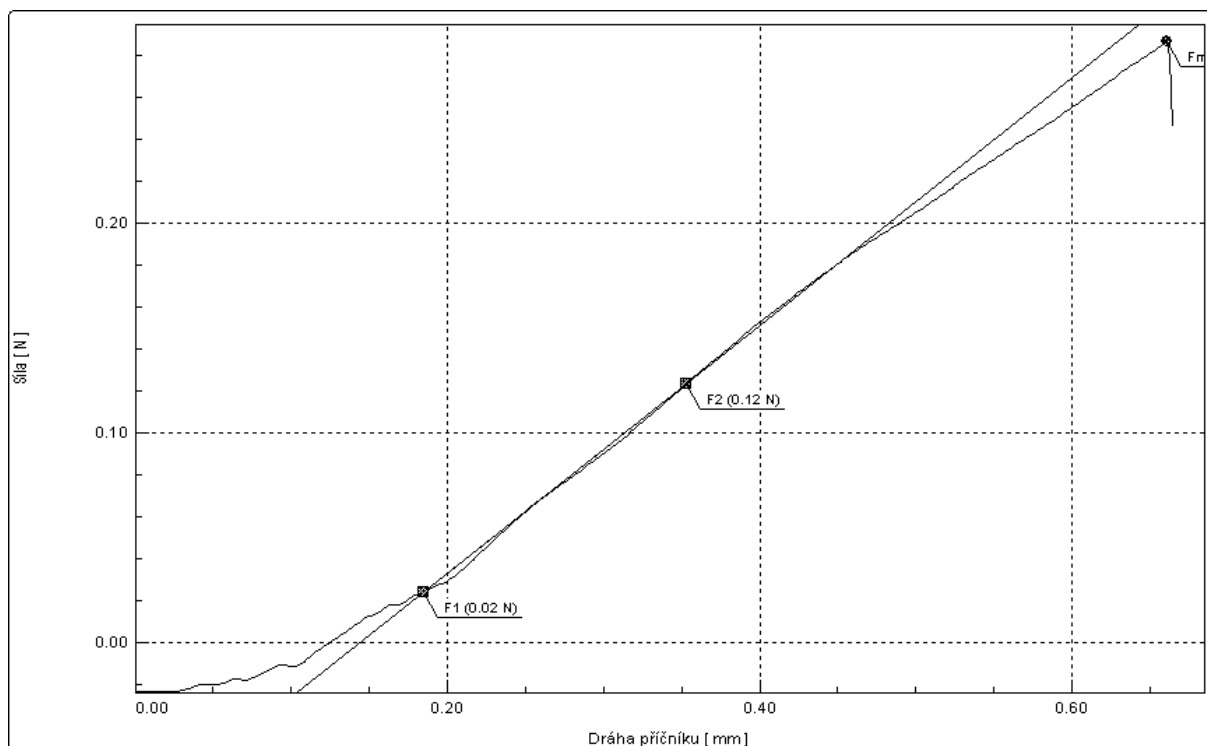
Vzorek č.9



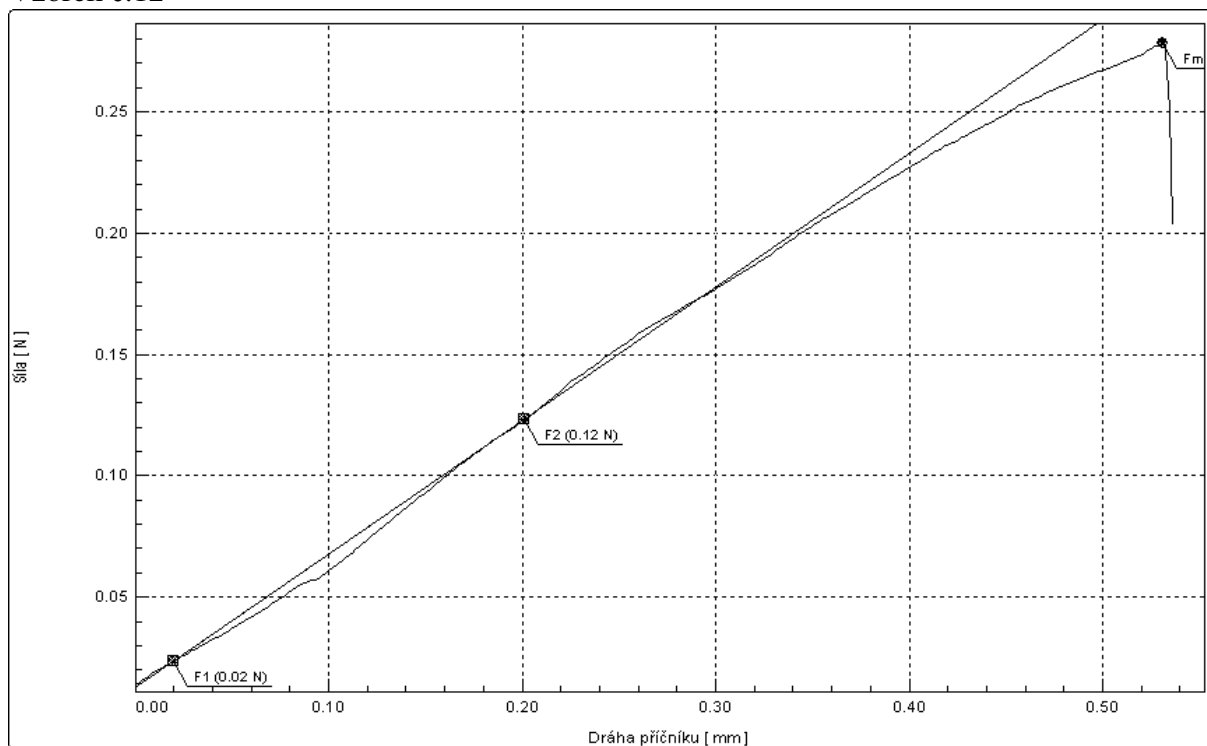
Vzorek č.10



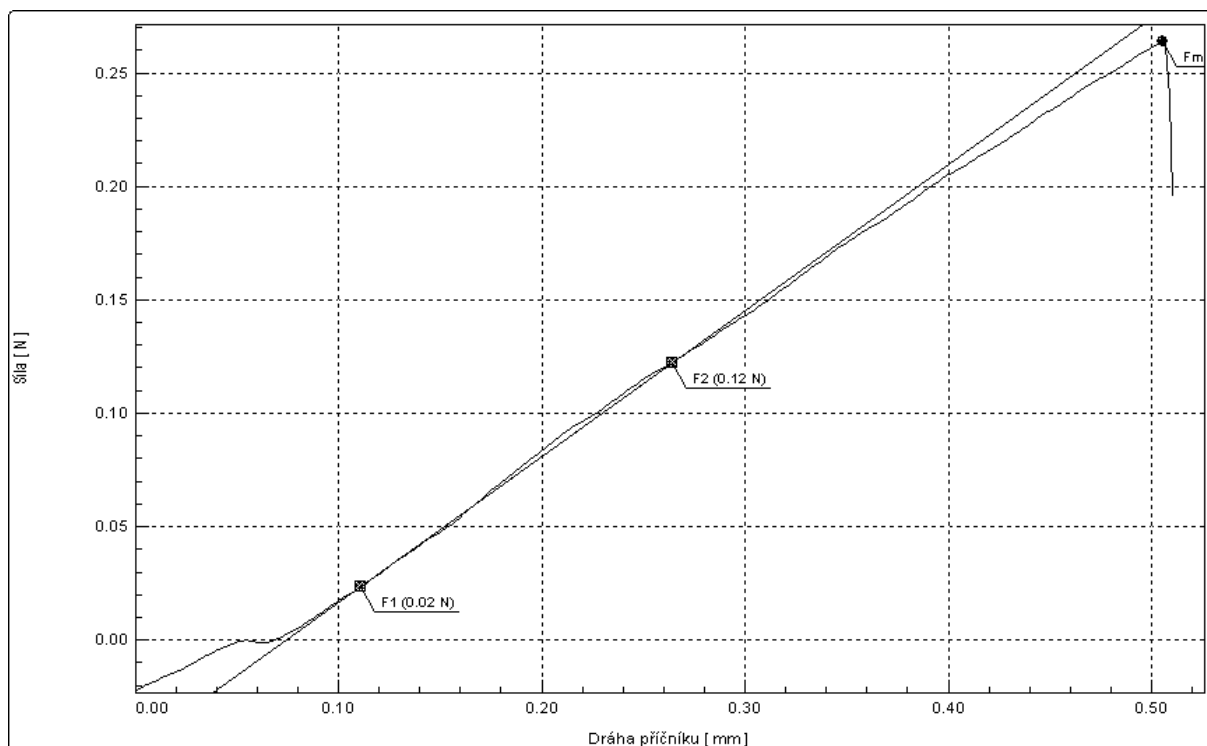
Vzorek č.11



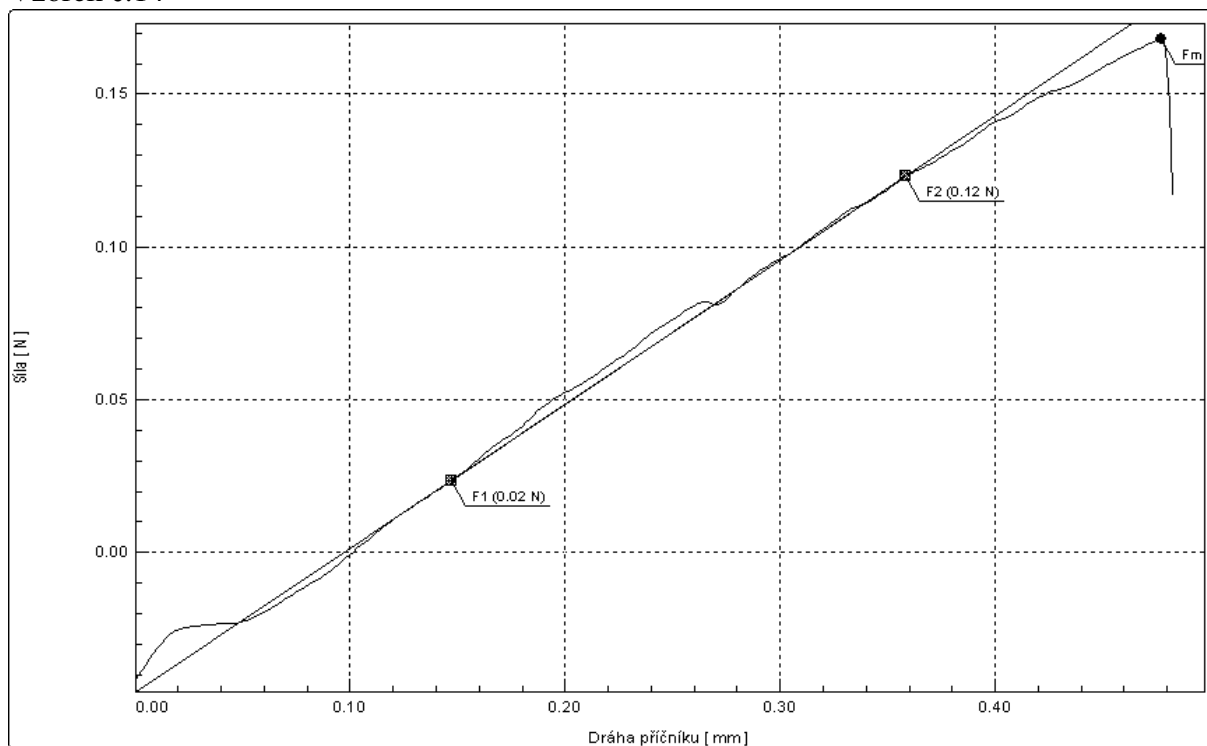
Vzorek č.12



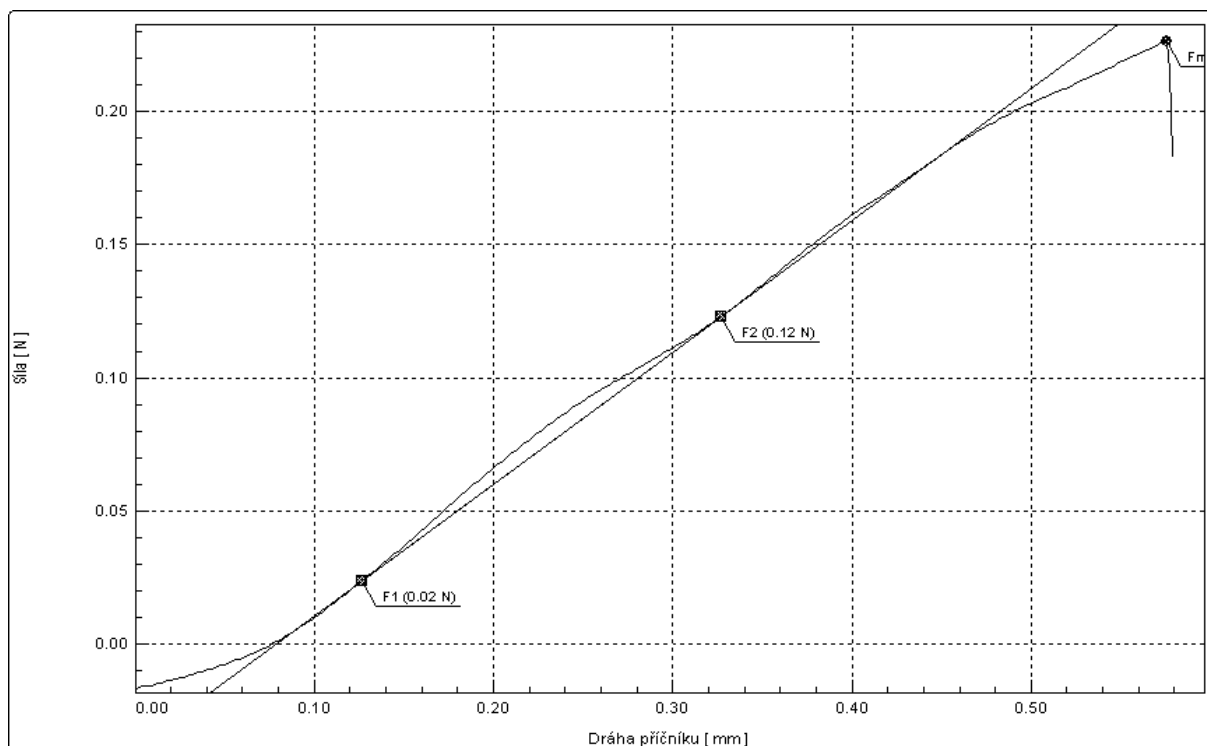
Vzorek č.13



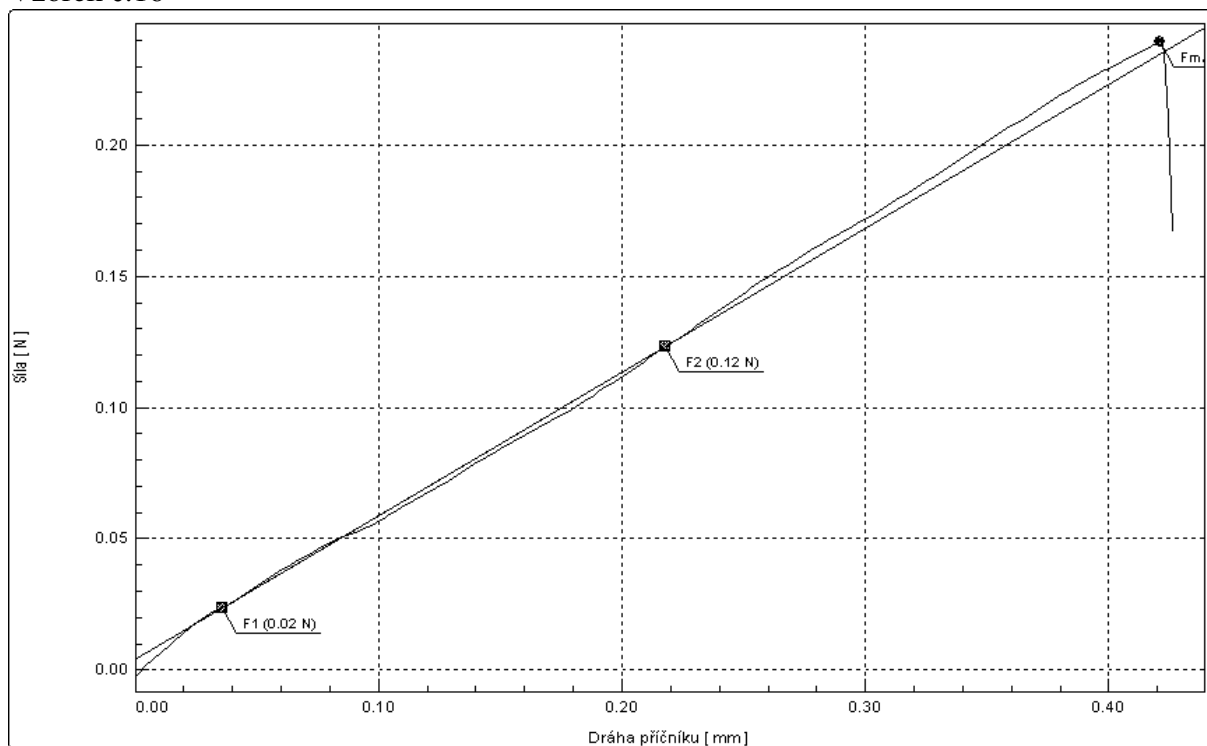
Vzorek č.14



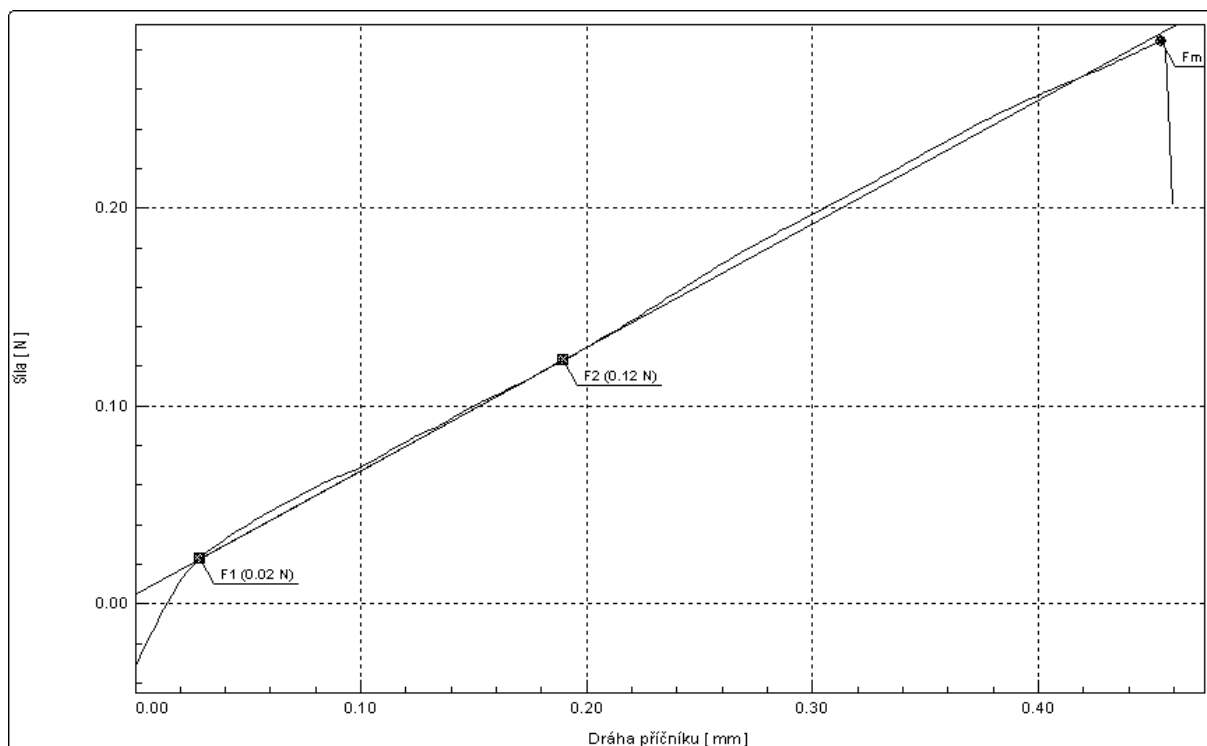
Vzorek č.15



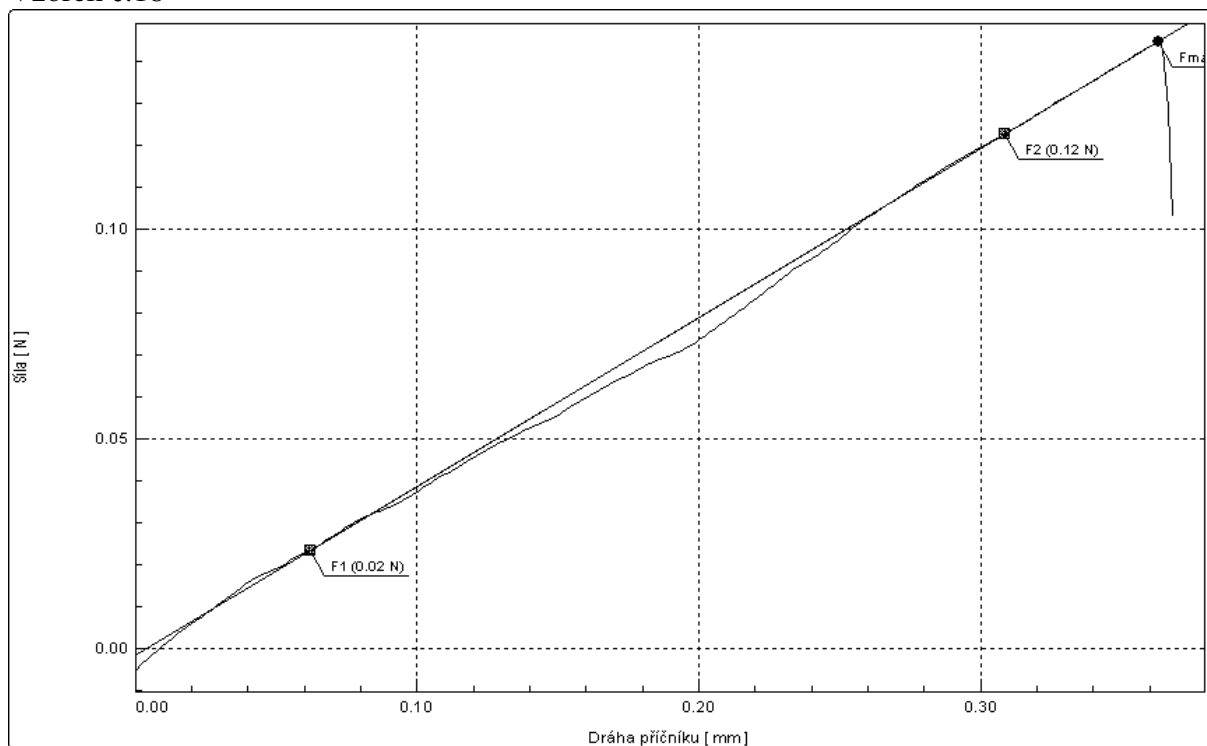
Vzorek č.16



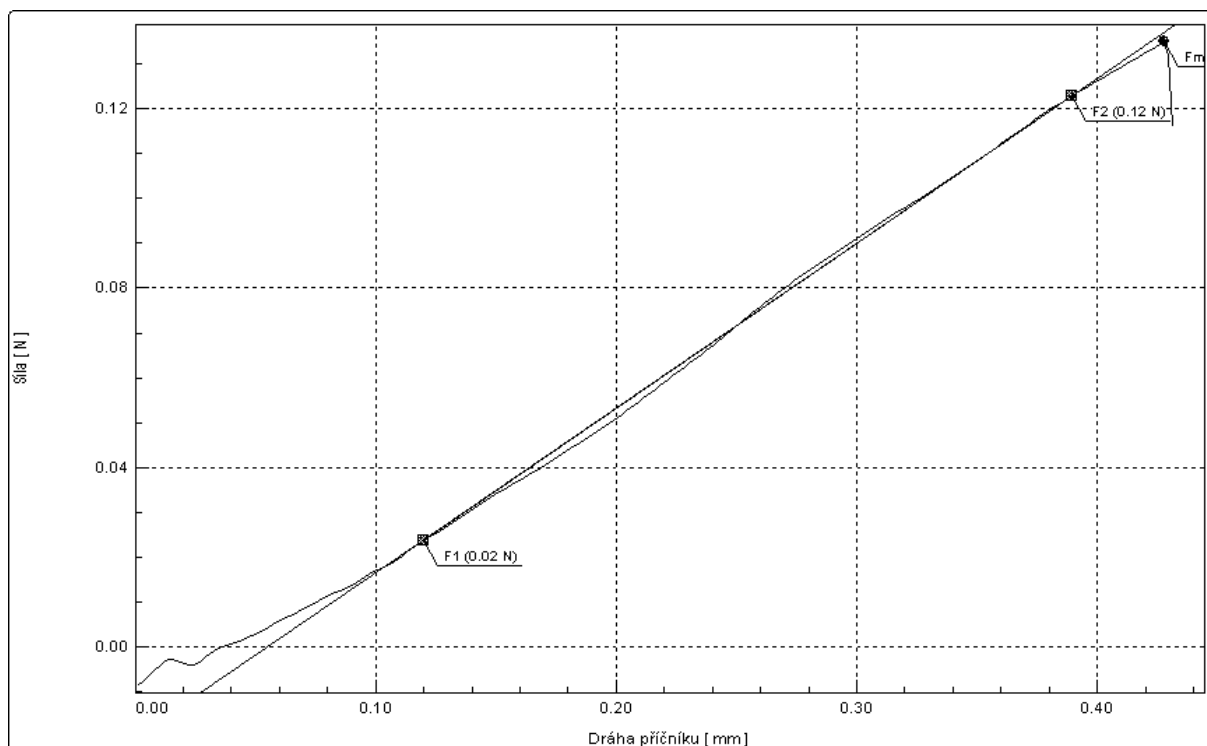
Vzorek č.17



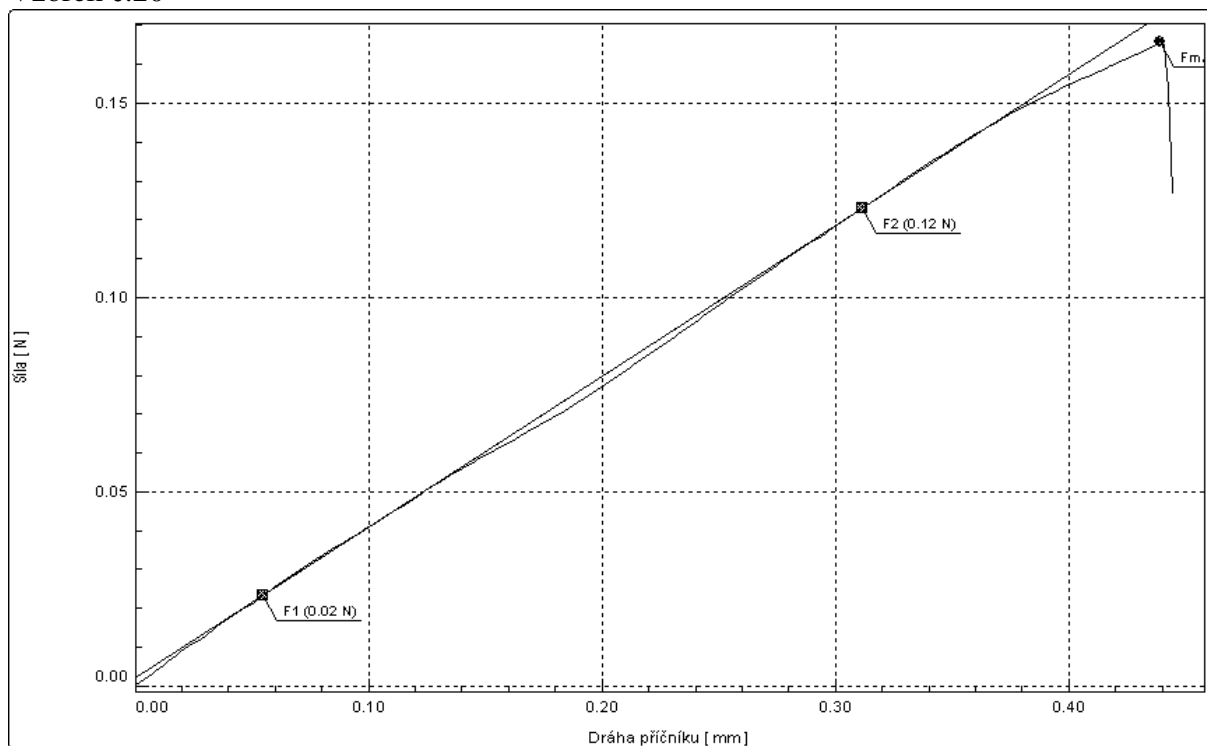
Vzorek č.18



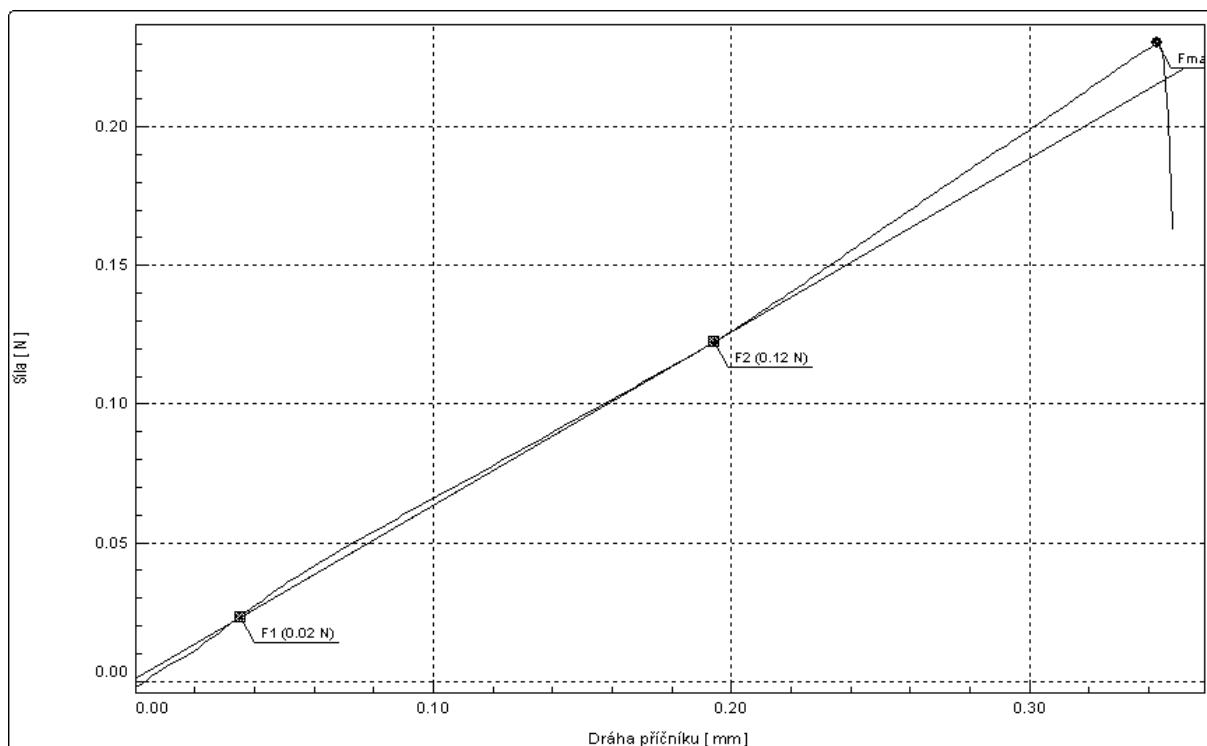
Vzorek č.19



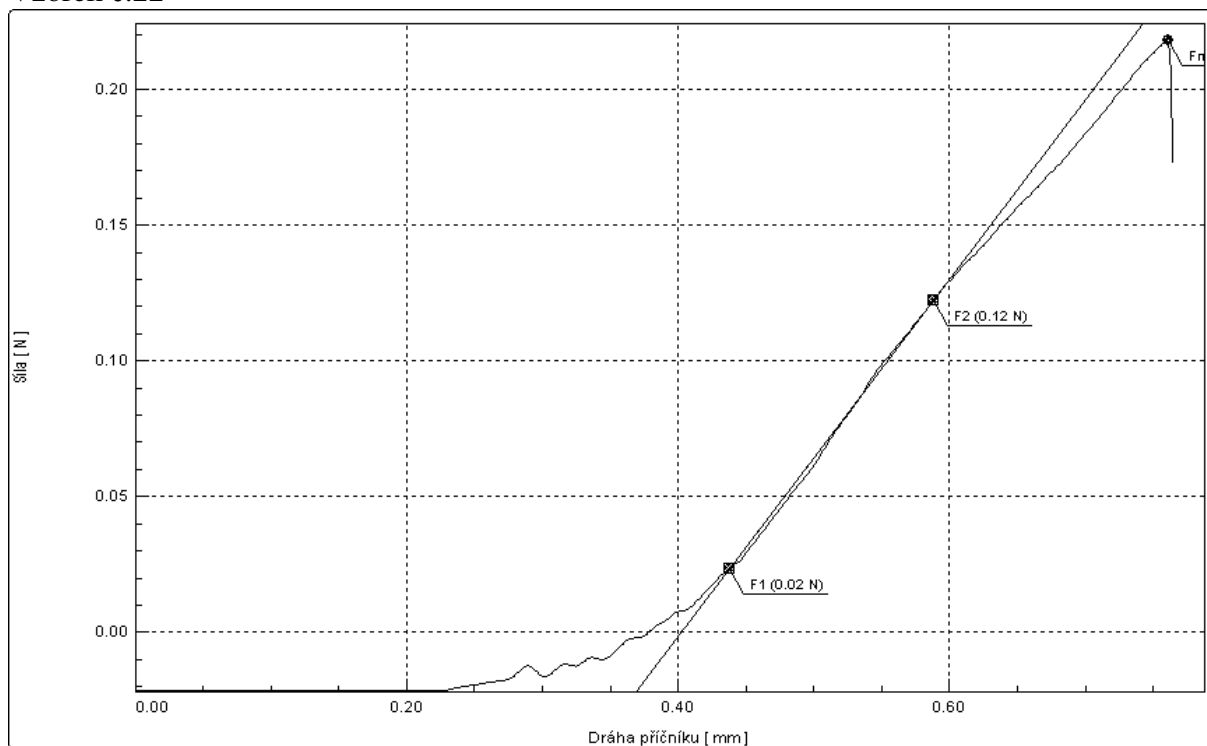
Vzorek č.20



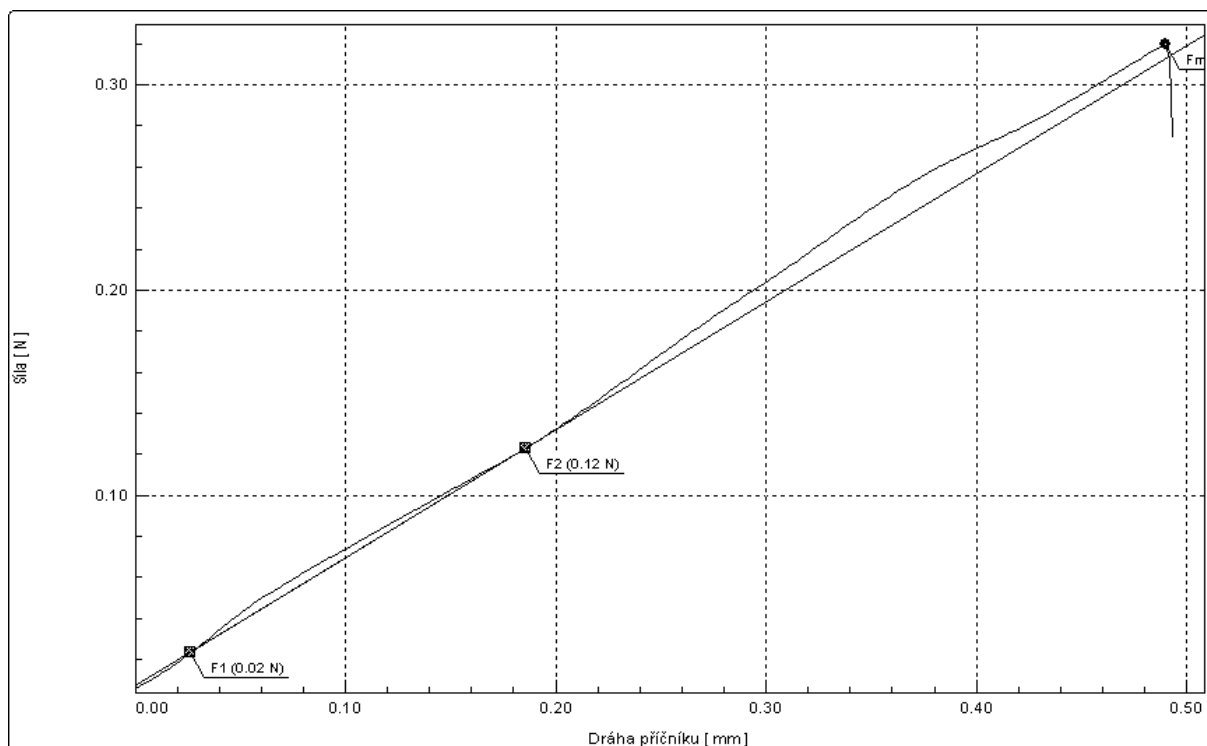
Vzorek č.21



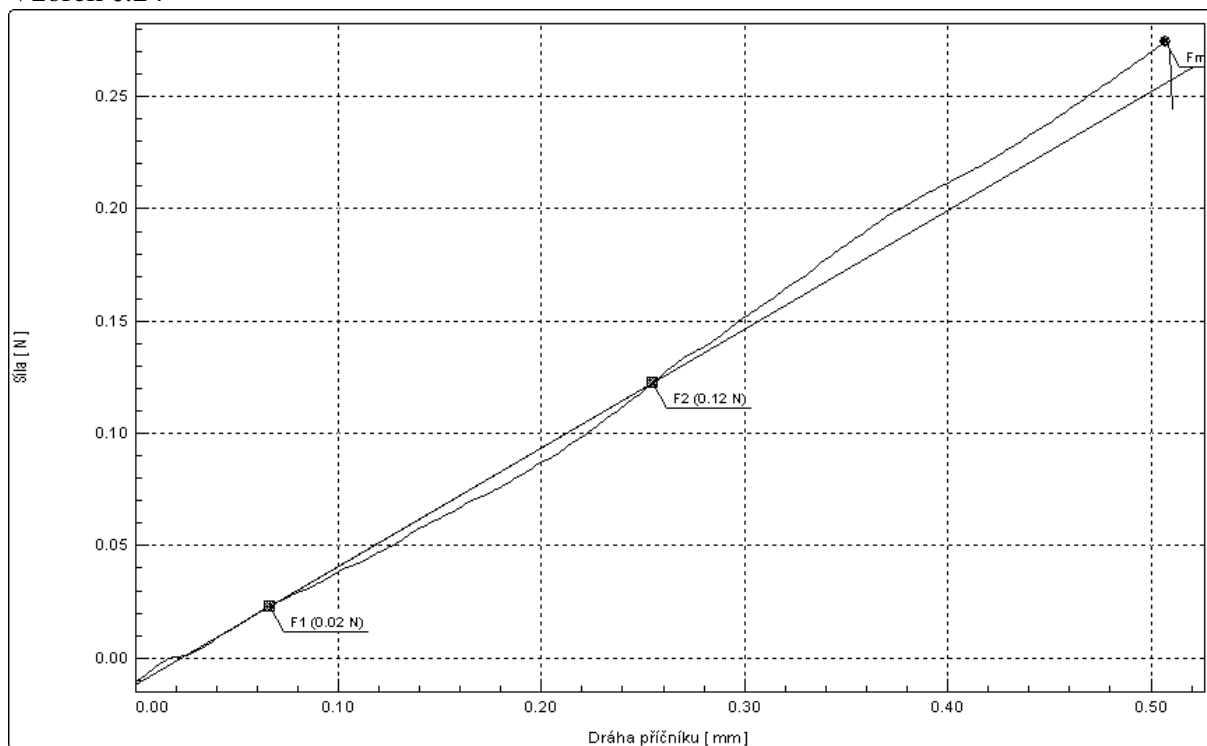
Vzorek č.22



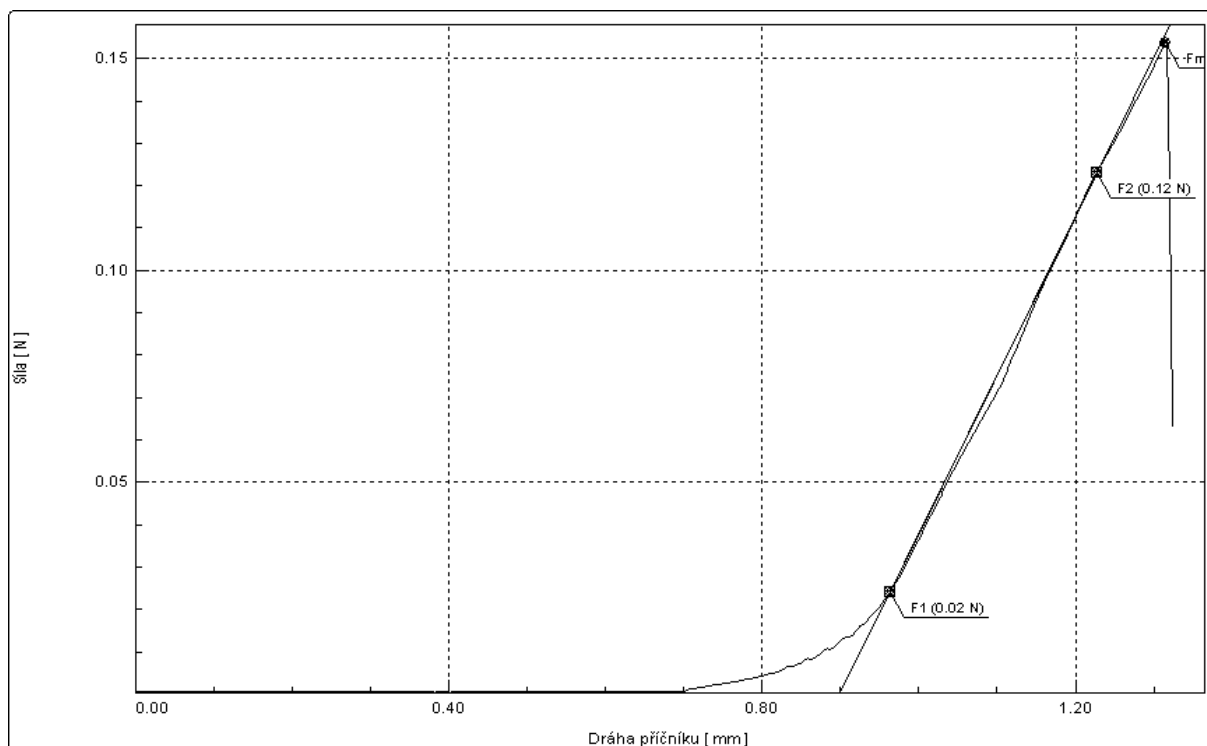
Vzorek č.23



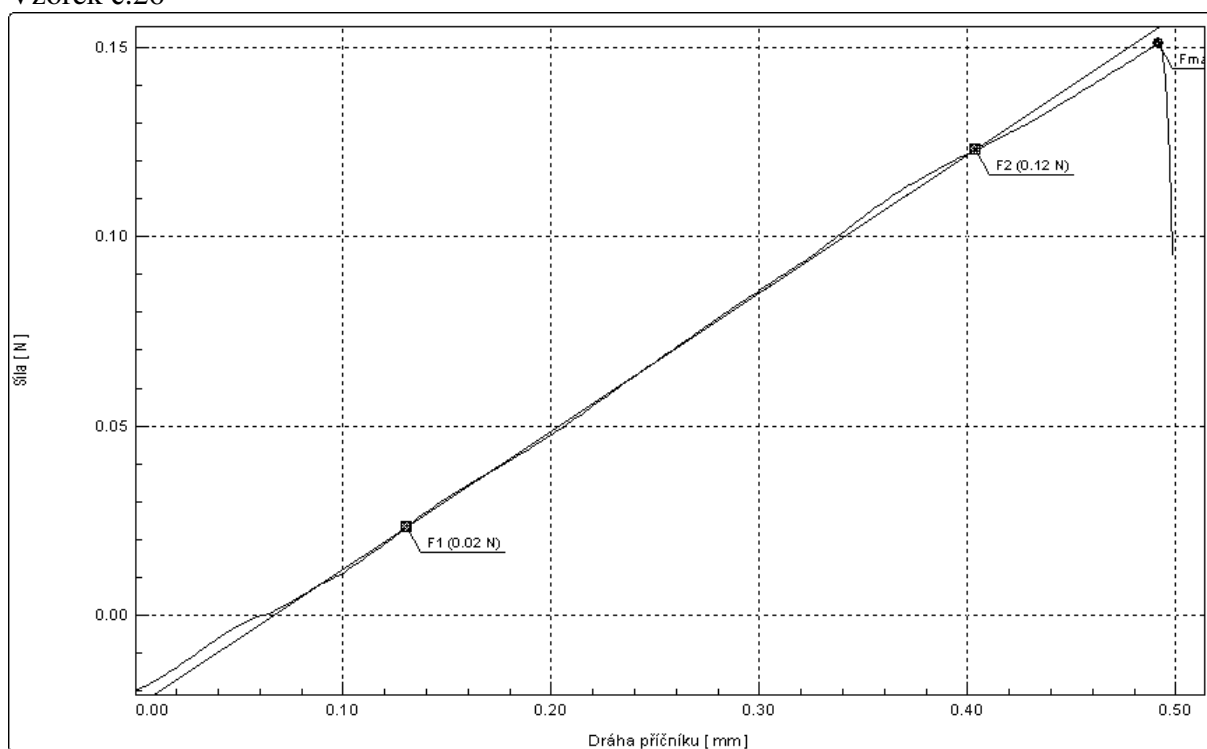
Vzorek č.24



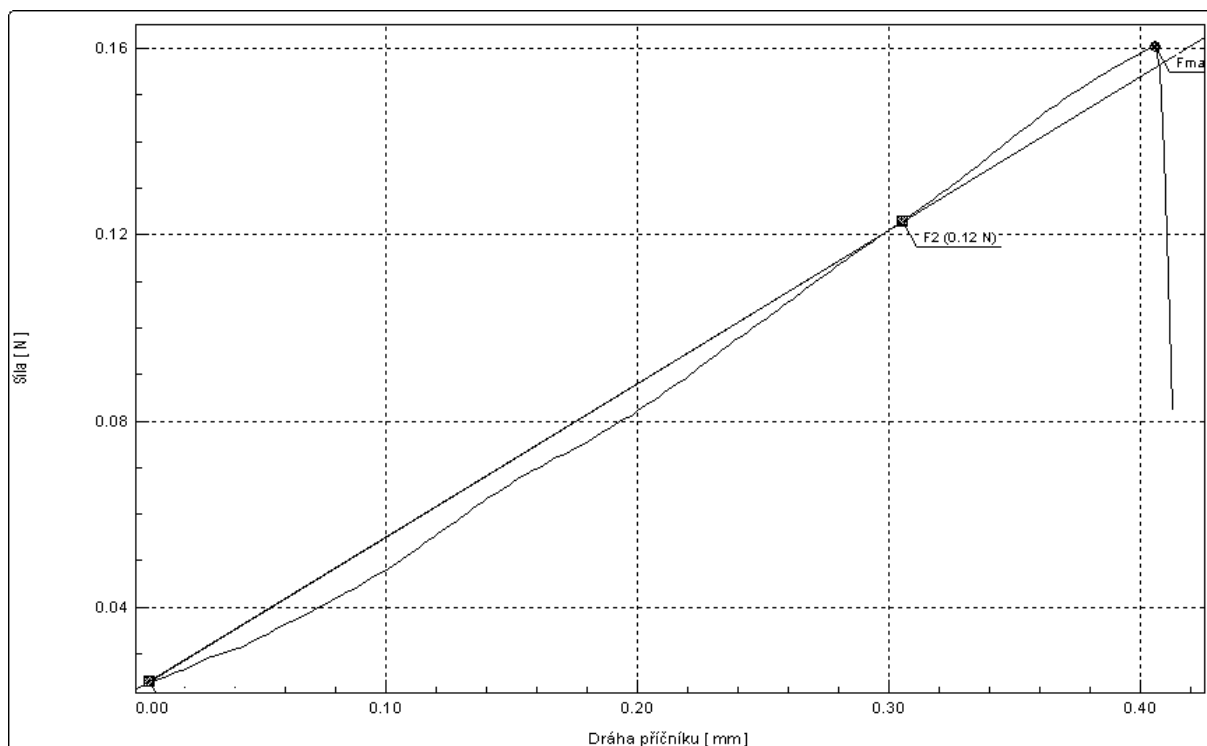
Vzorek č.25



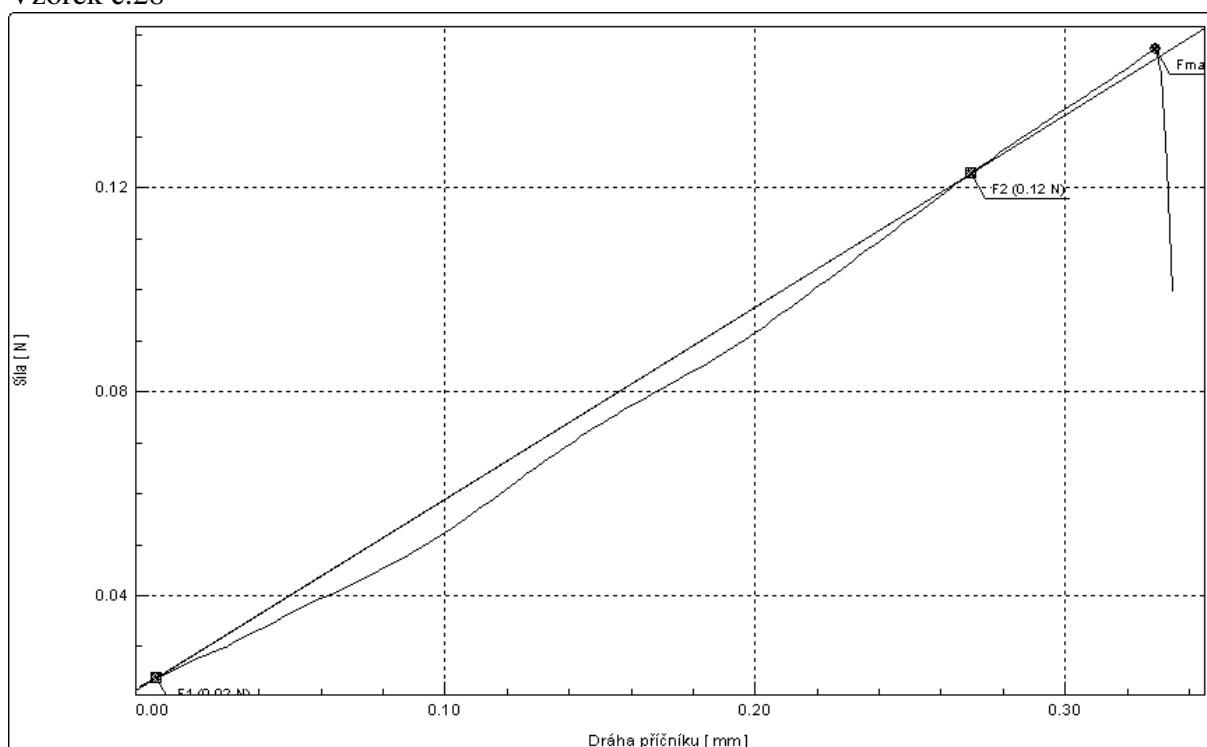
Vzorek č.26



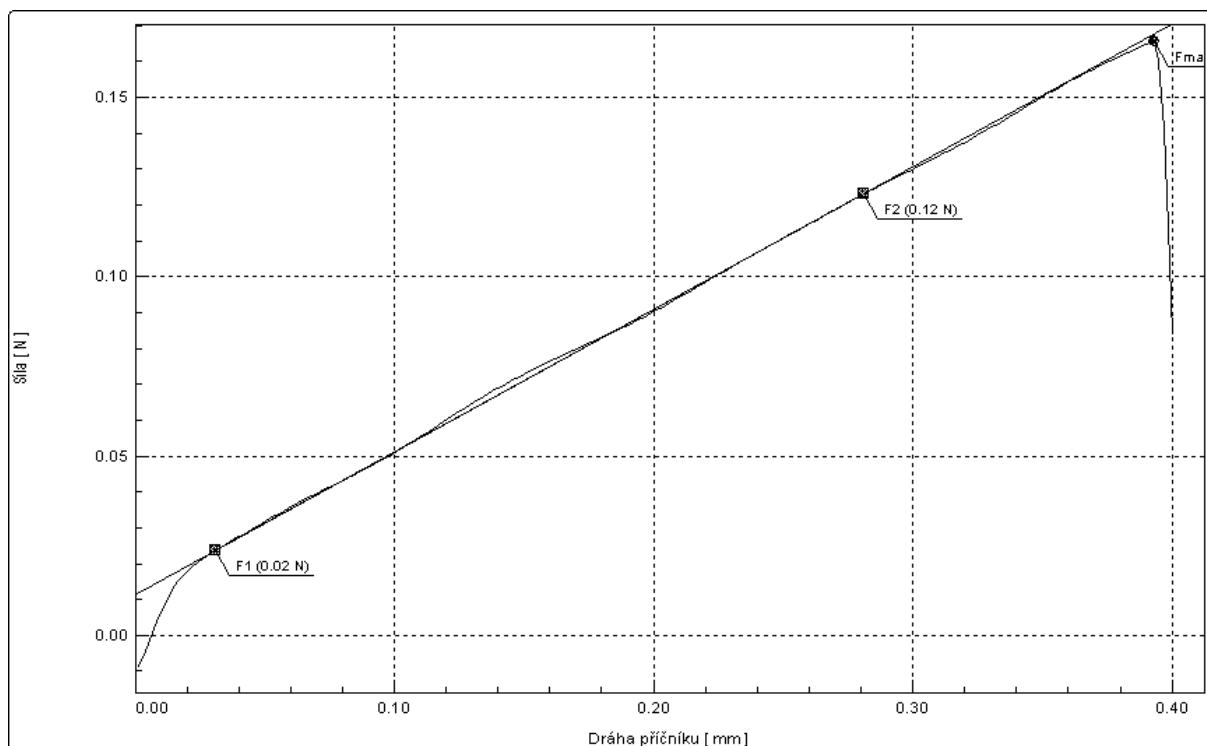
Vzorek č.27



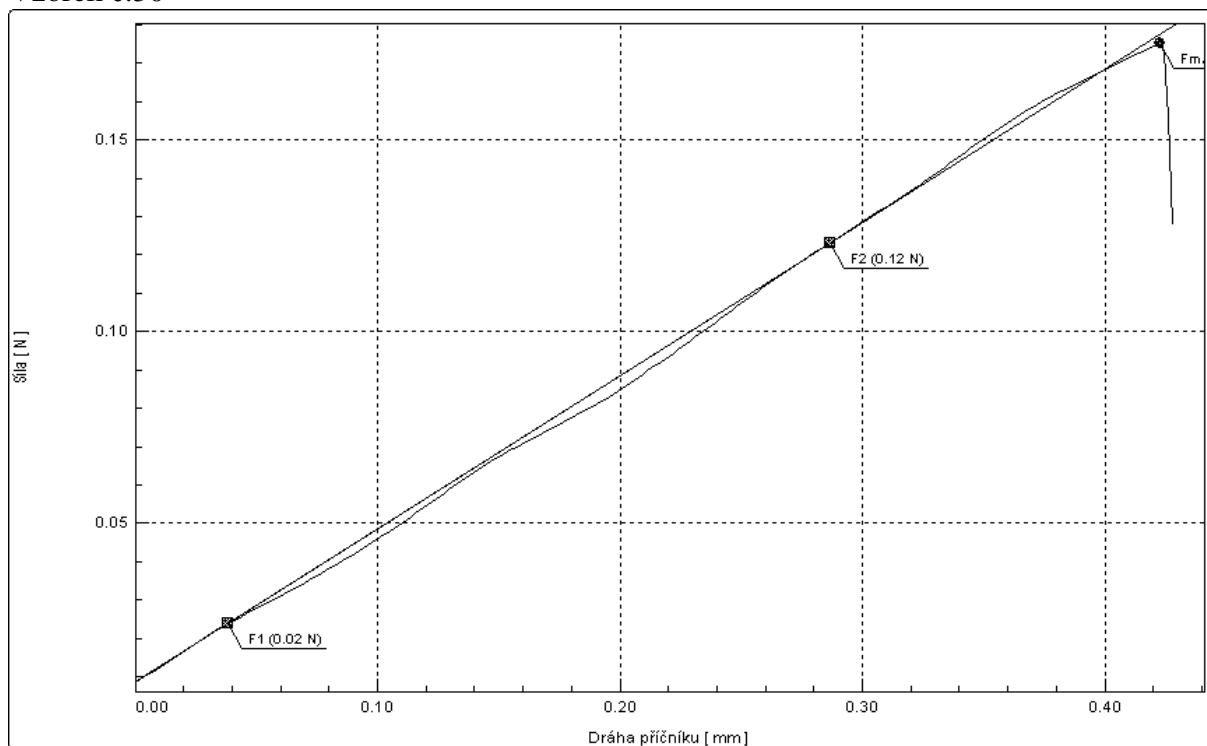
Vzorek č.28



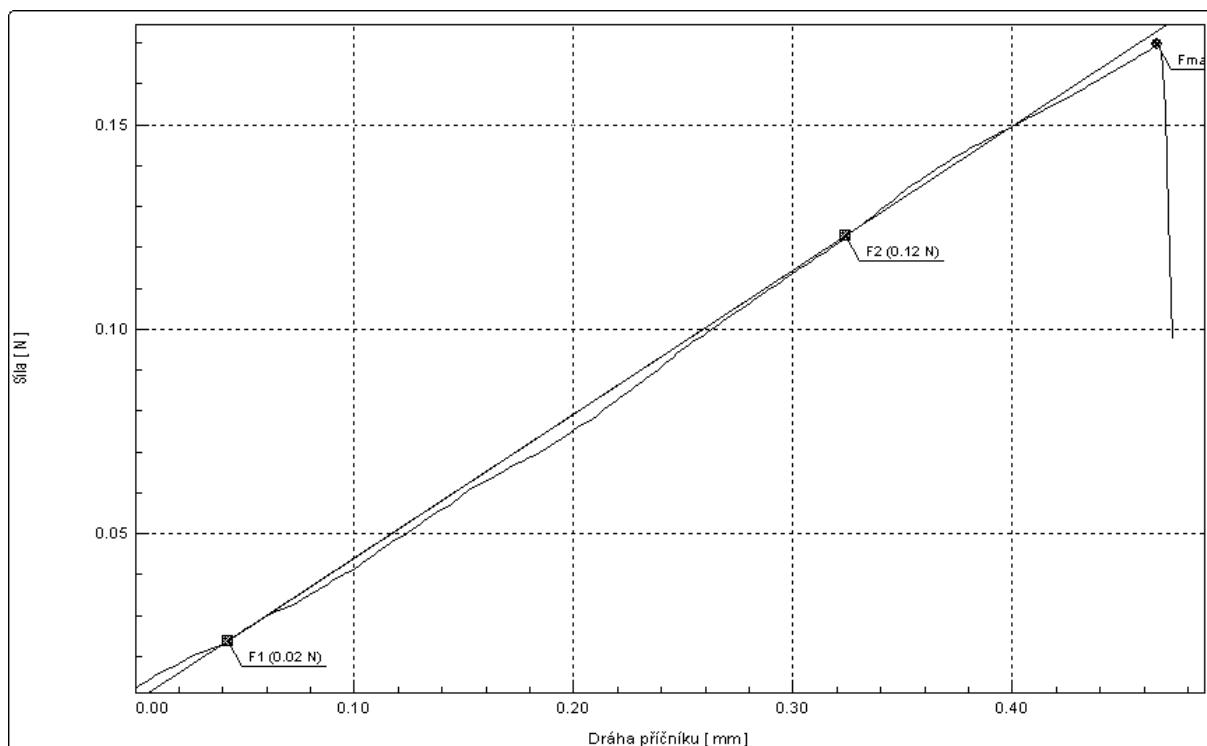
Vzorek č.29



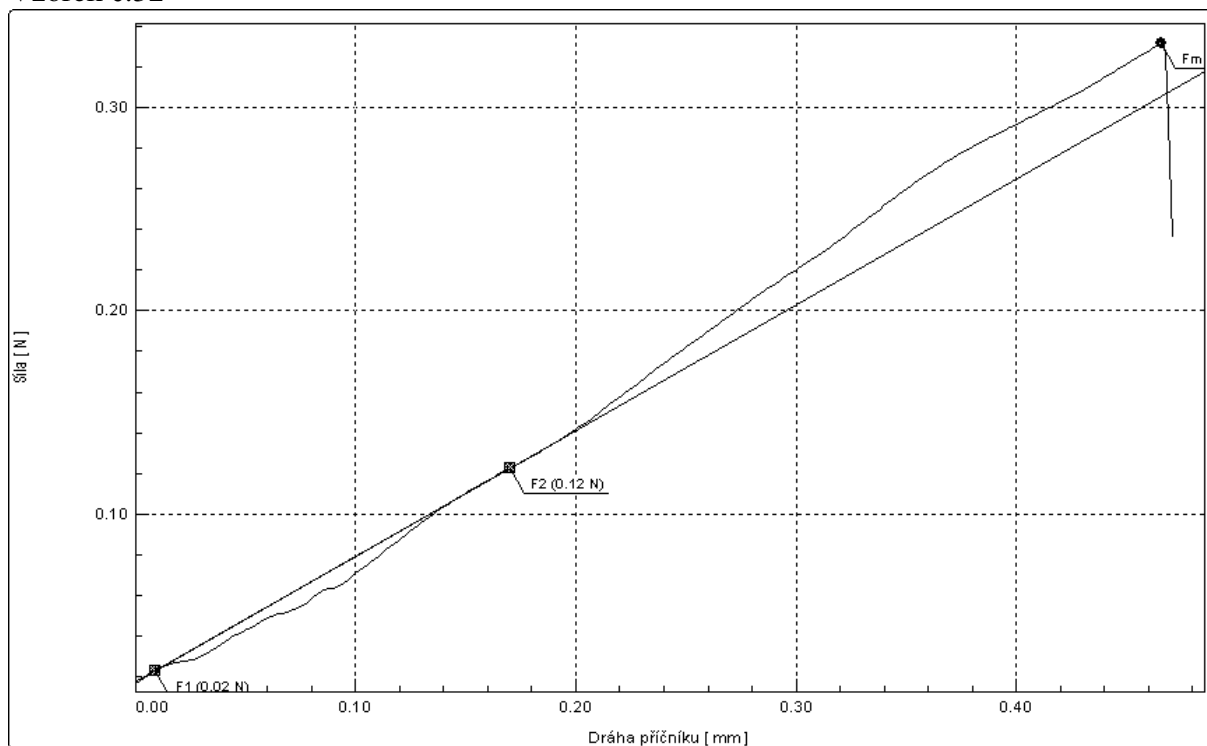
Vzorek č.30



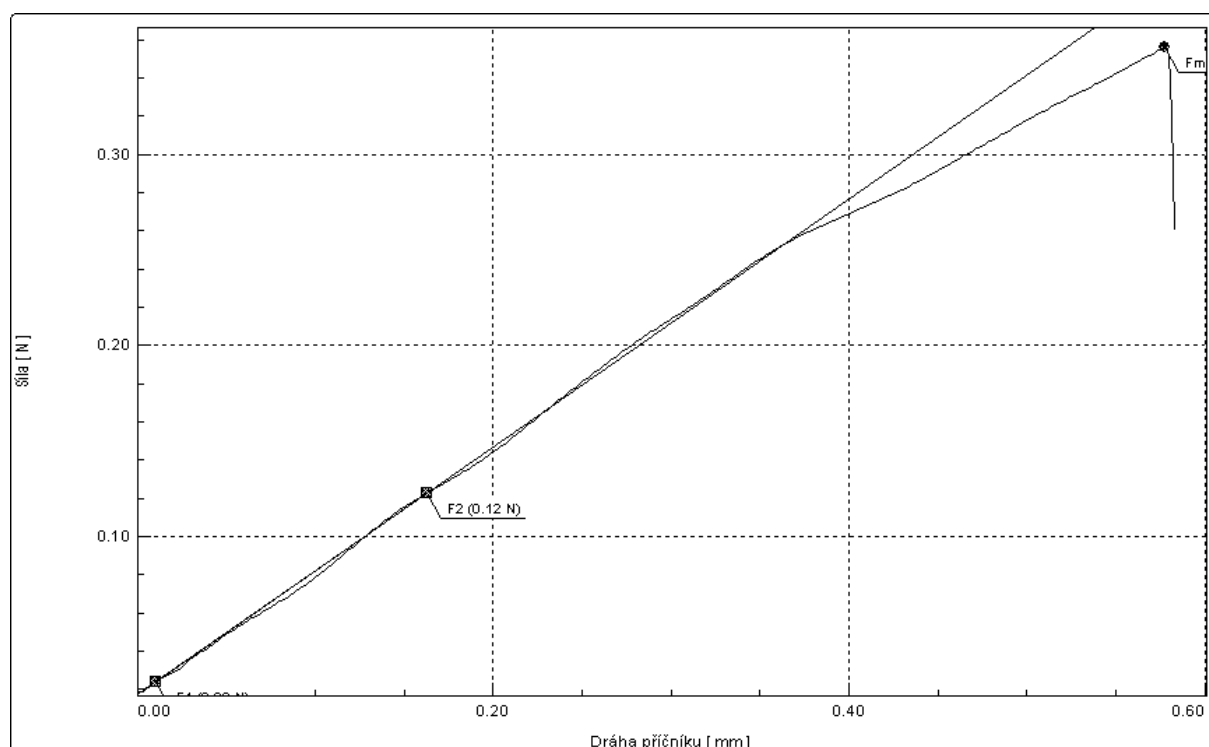
Vzorek č.31



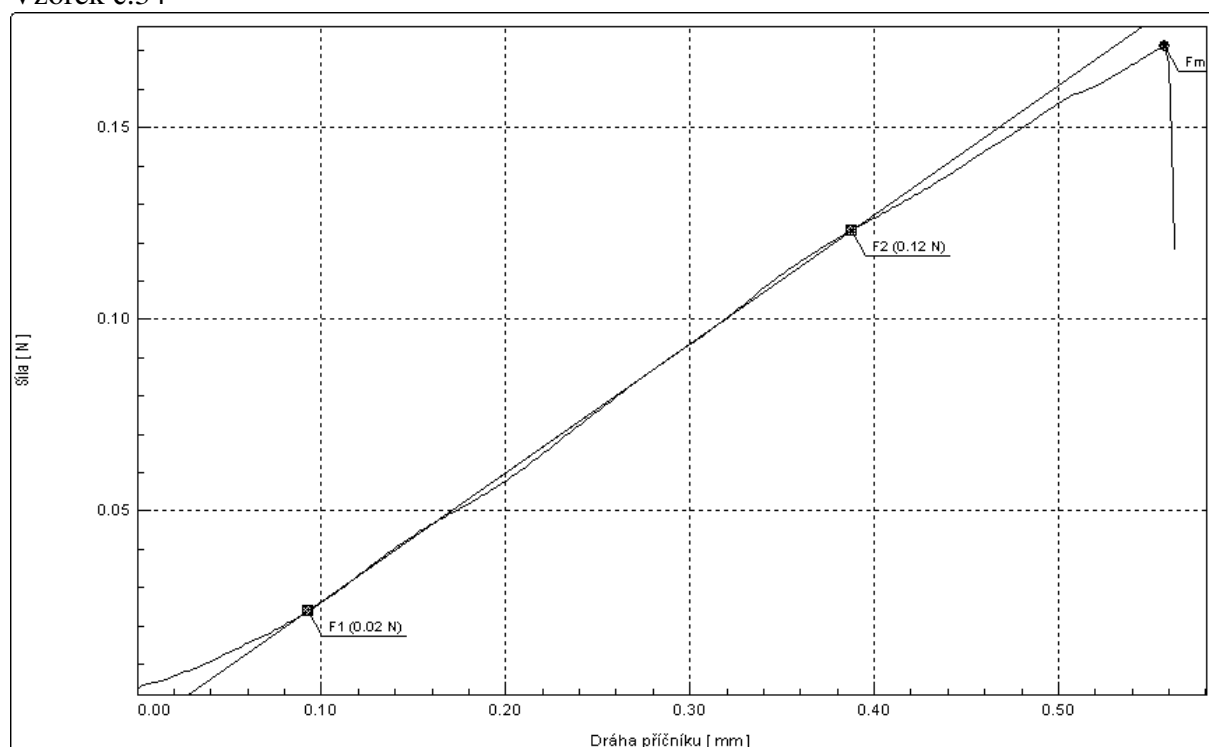
Vzorek č.32



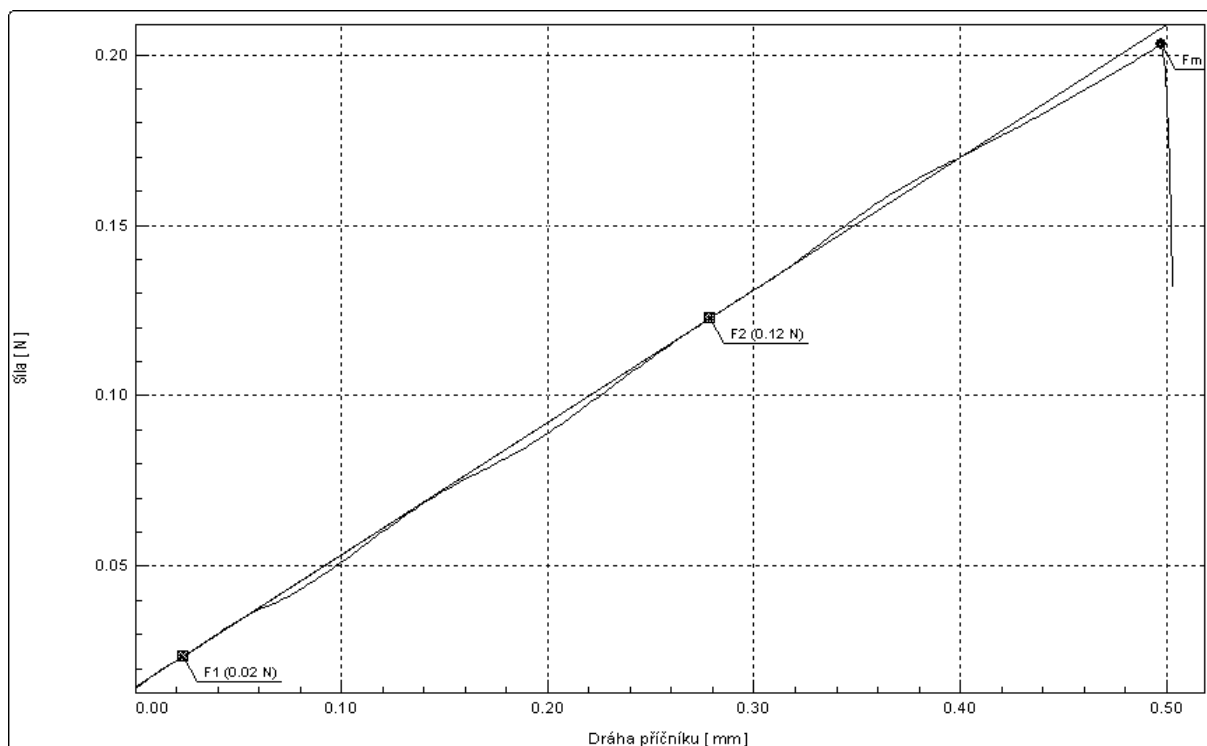
Vzorek č.33



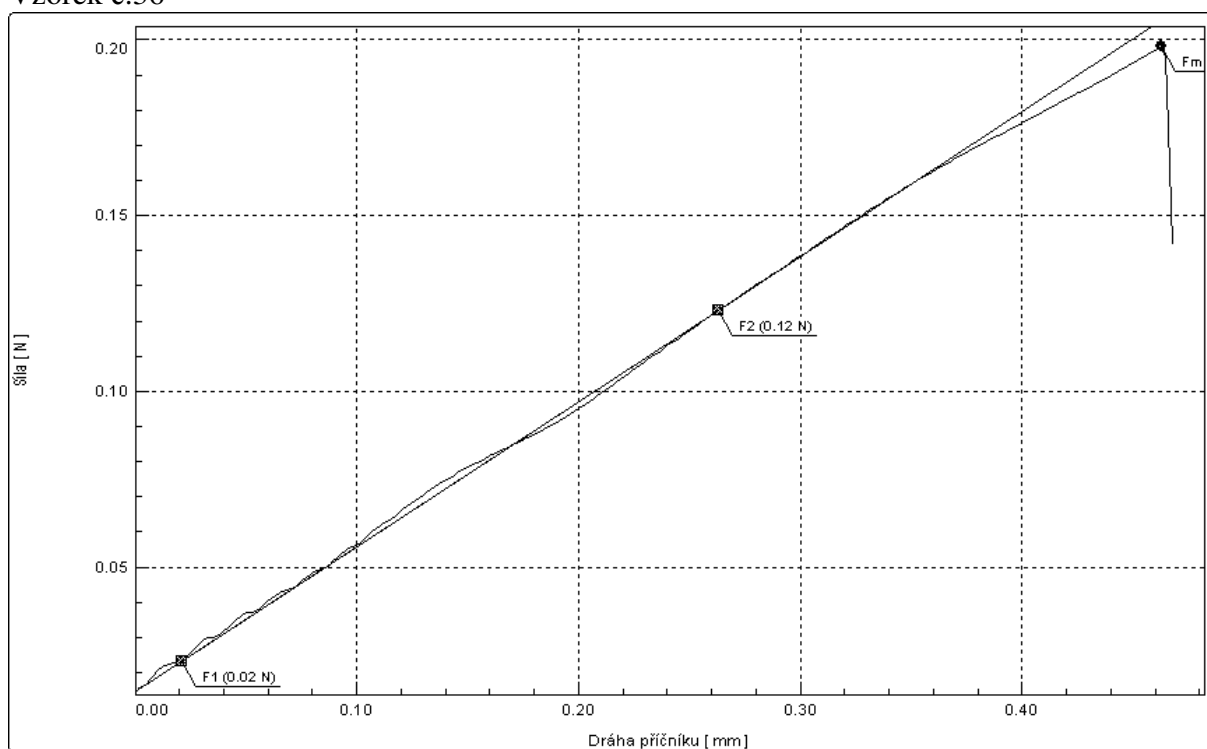
Vzorek č.34



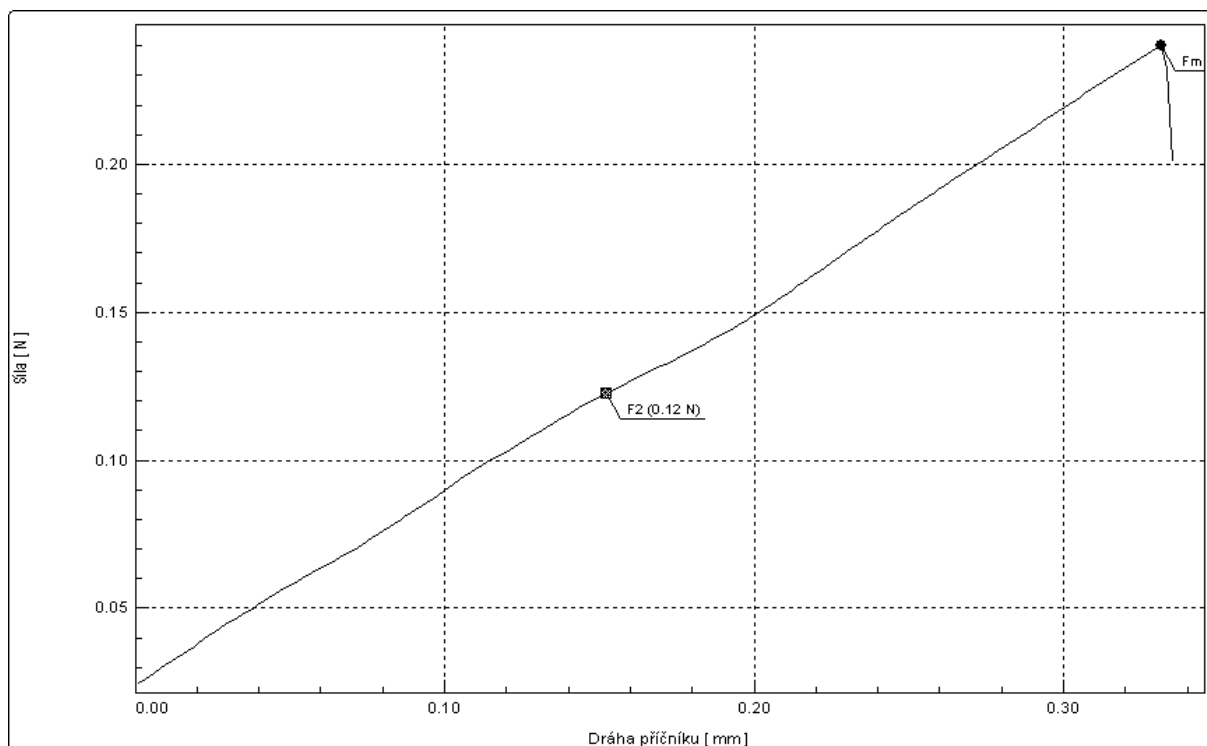
Vzorek č.35



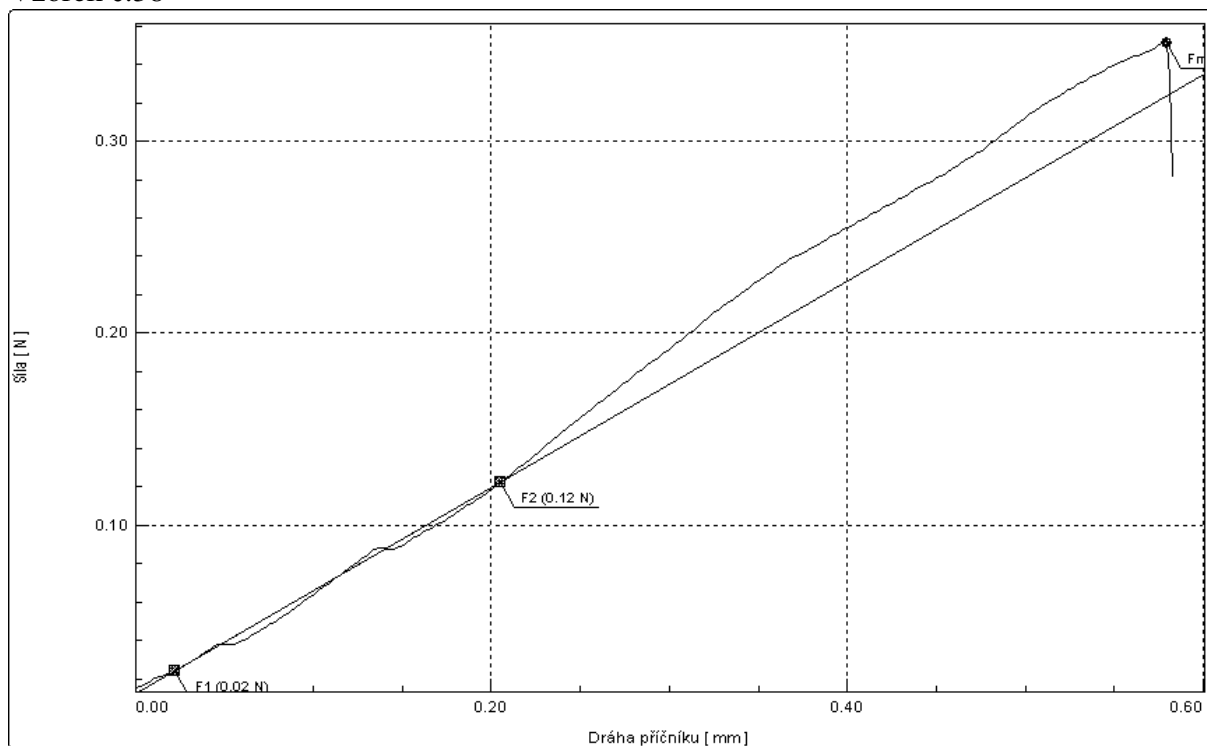
Vzorek č.36



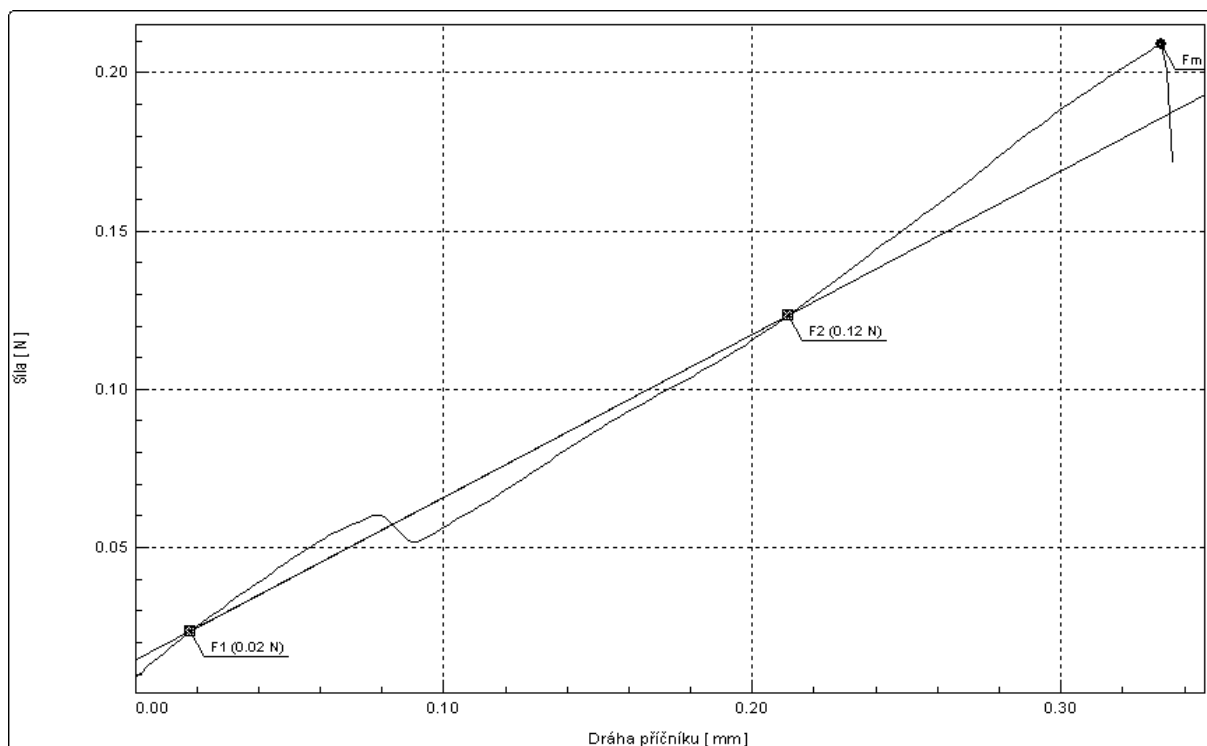
Vzorek č.37



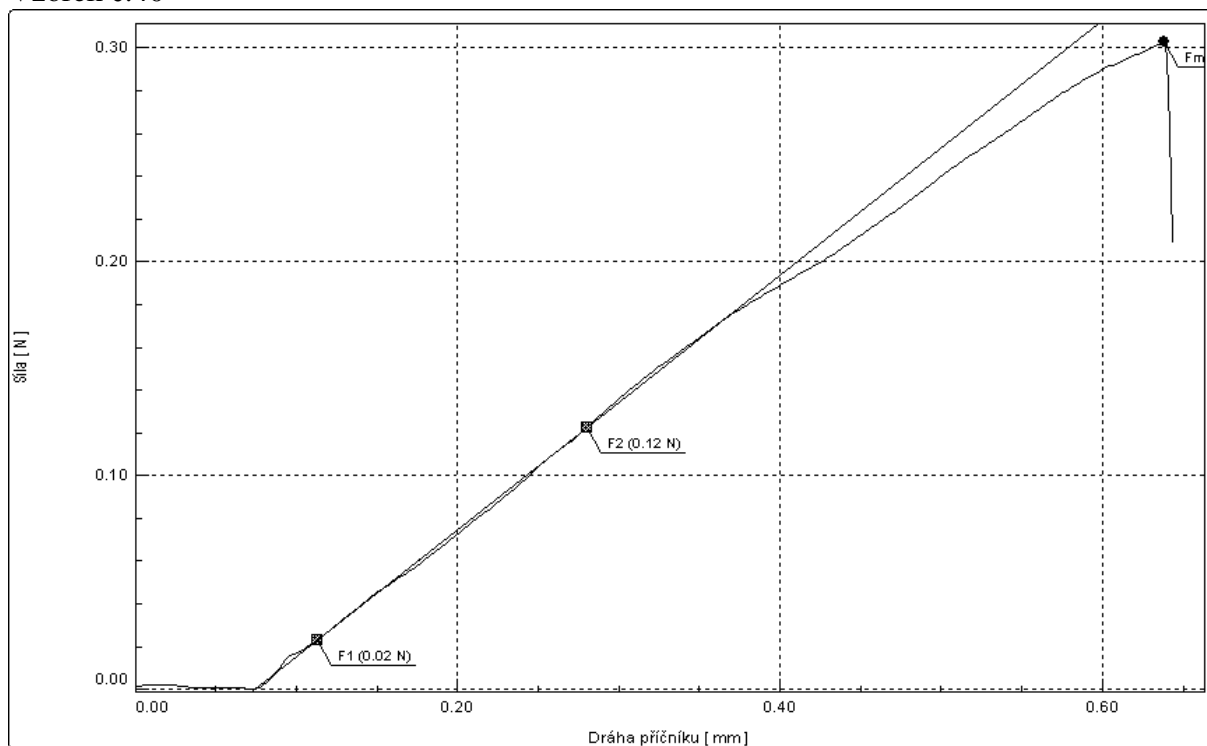
Vzorek č.38



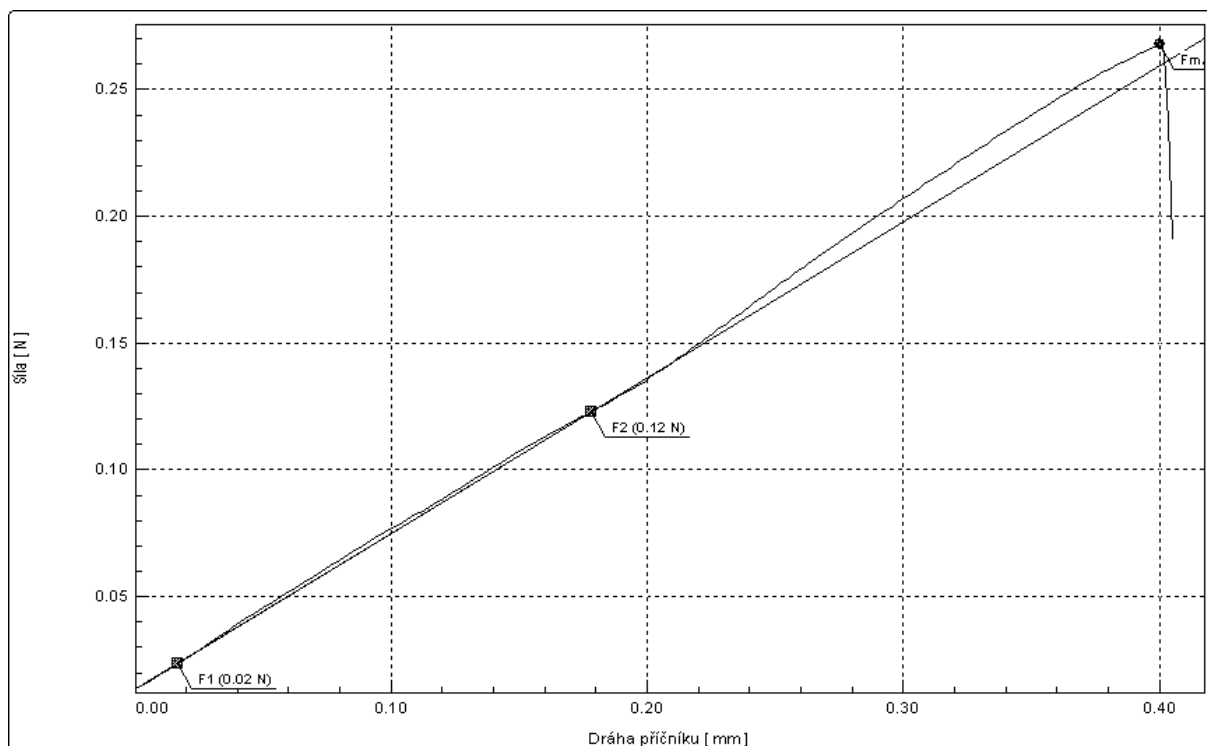
Vzorek č.39



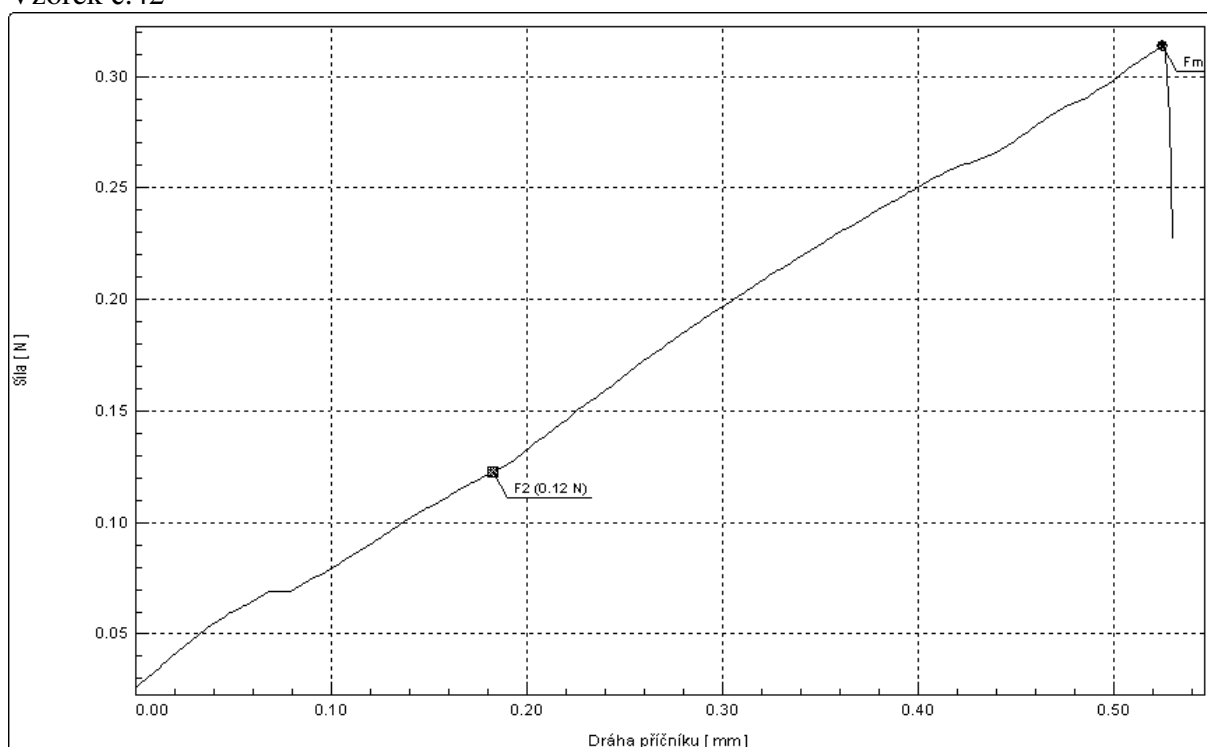
Vzorek č.40



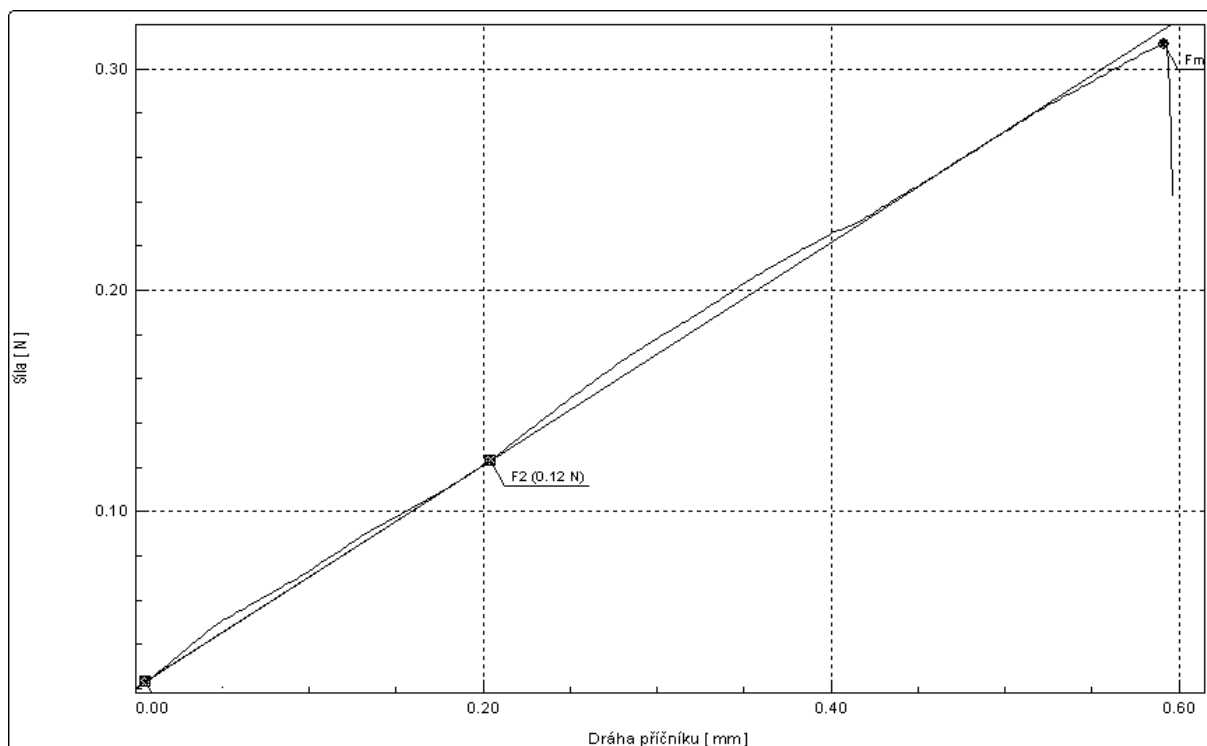
Vzorek č.41



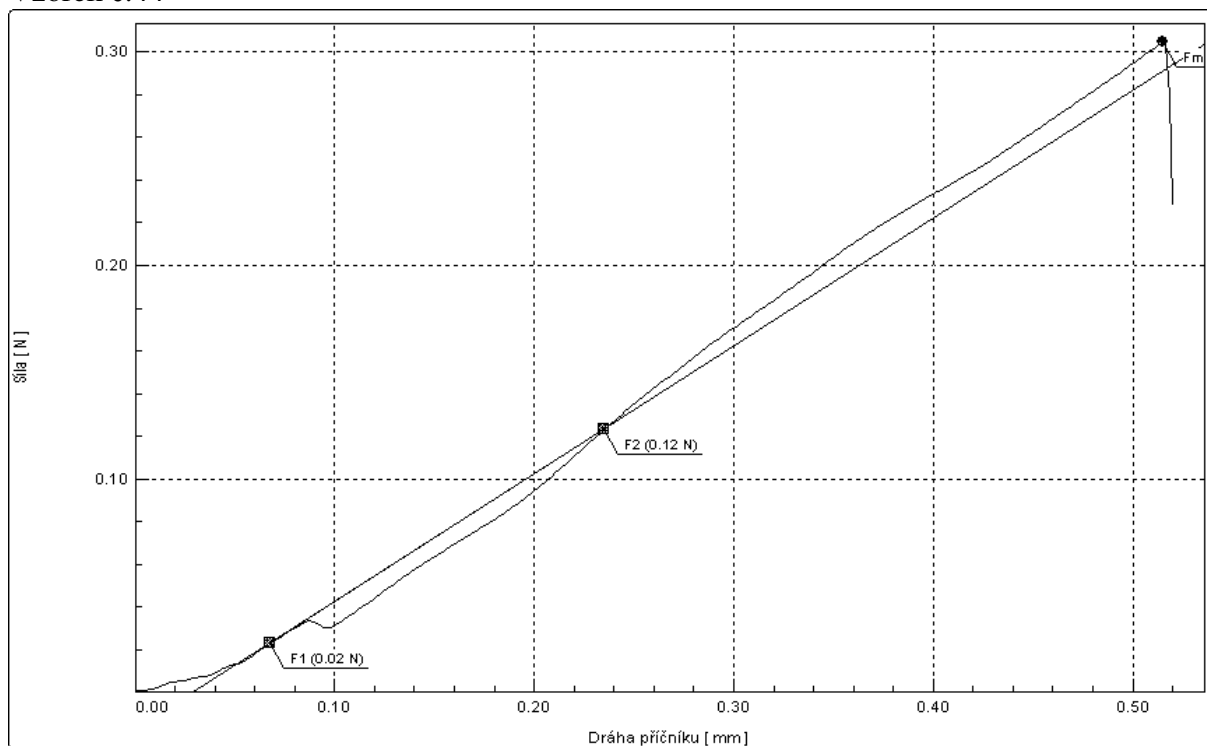
Vzorek č.42



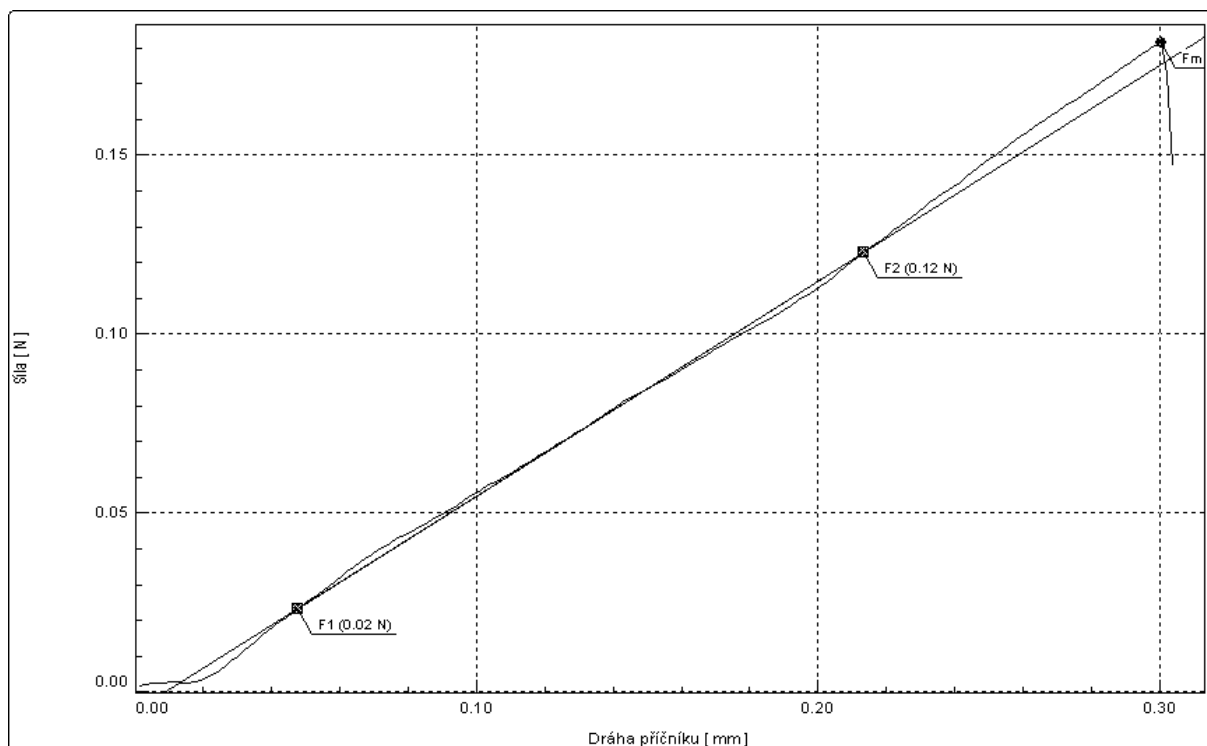
Vzorek č.43



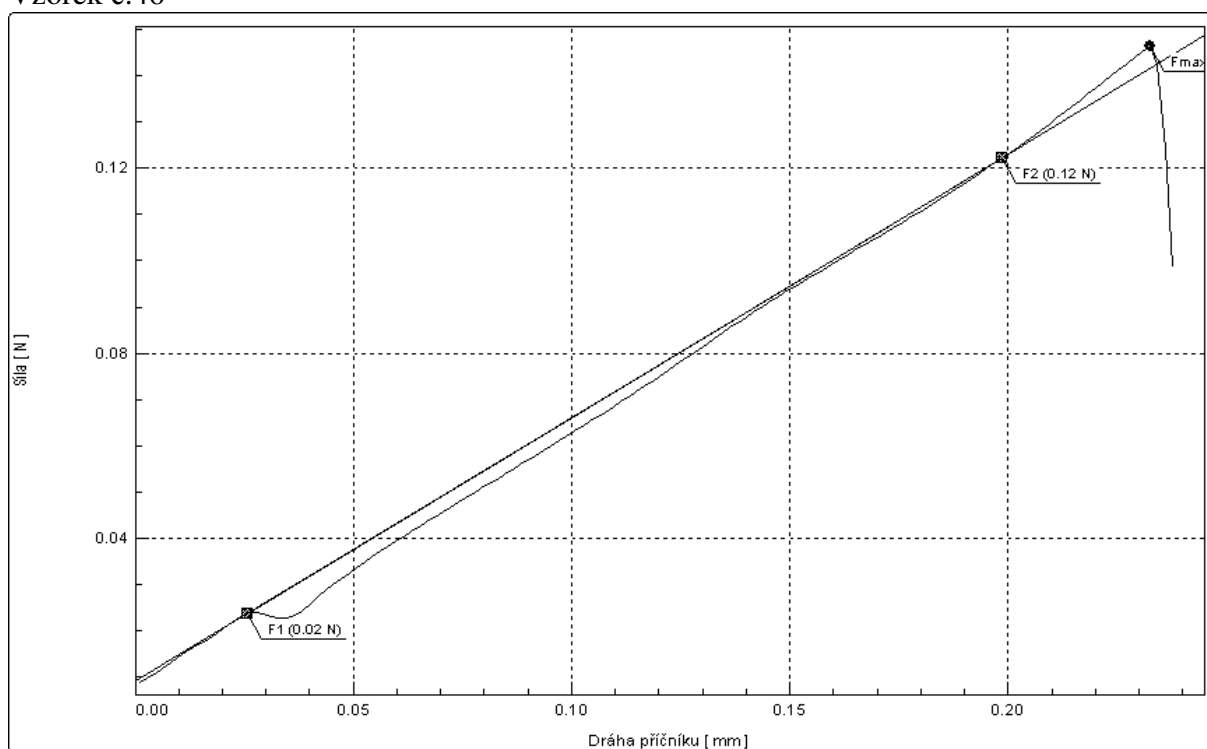
Vzorek č.44



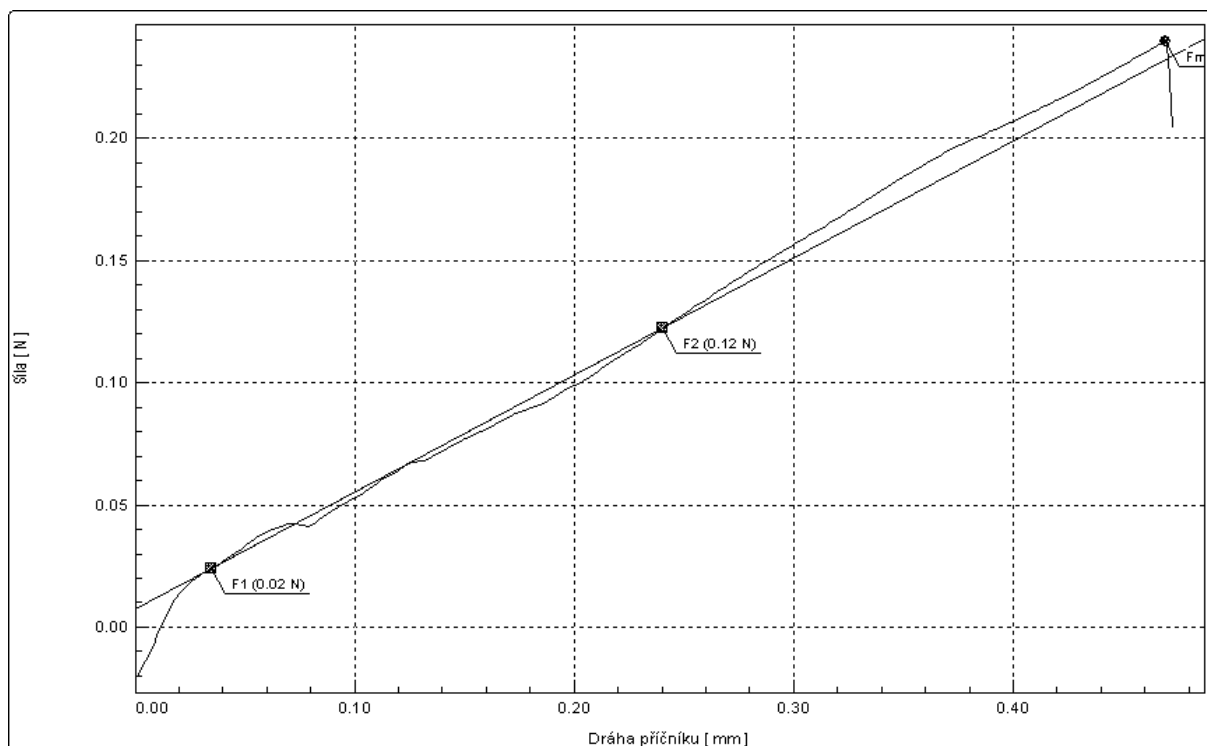
Vzorek č.45



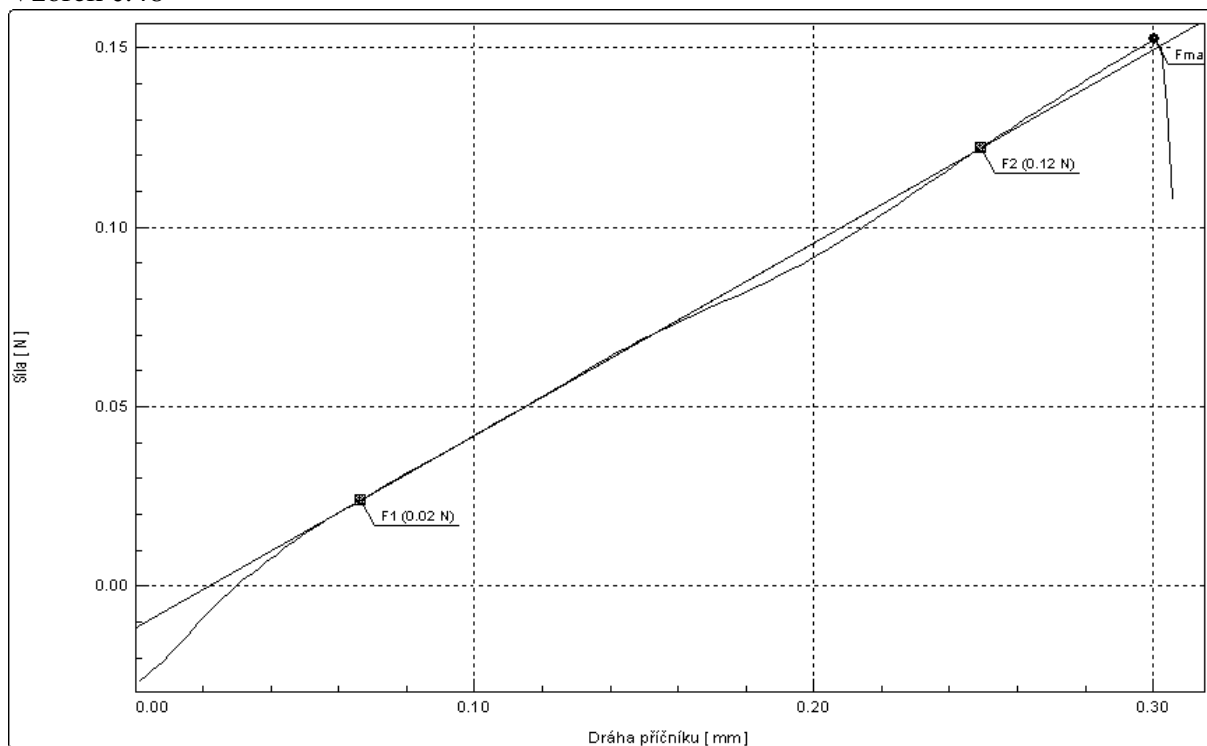
Vzorek č.46



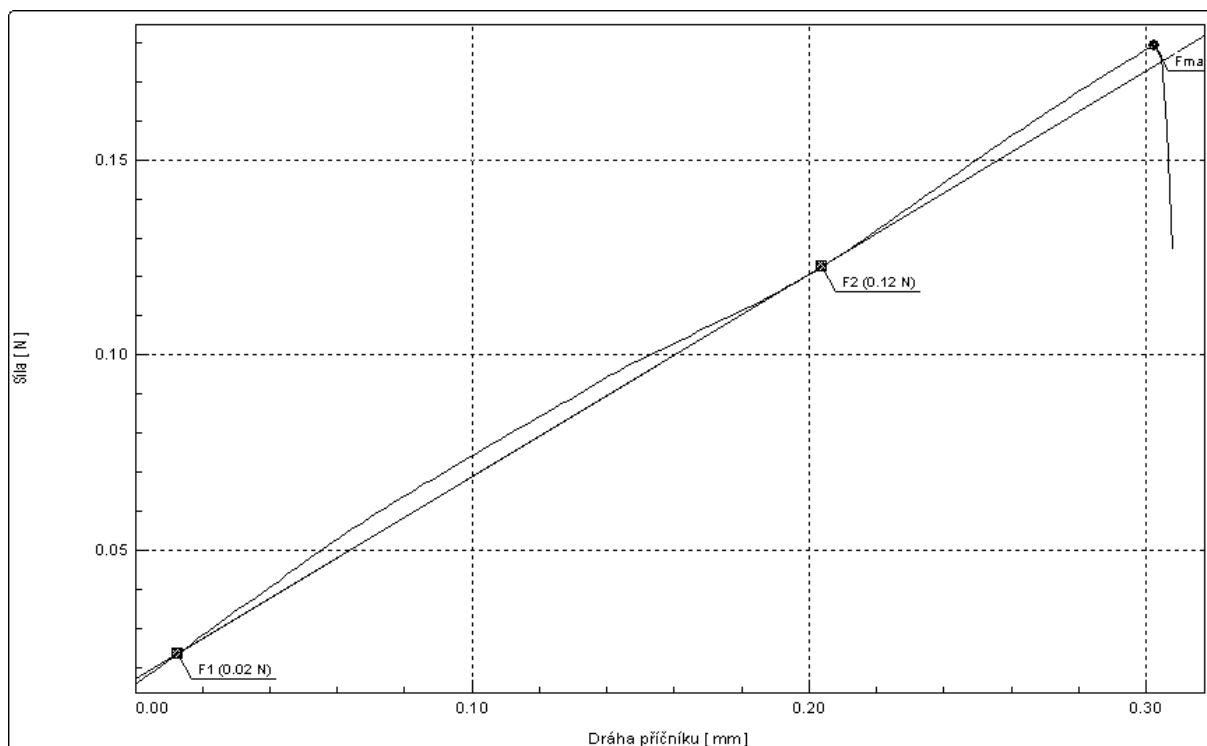
Vzorek č.47



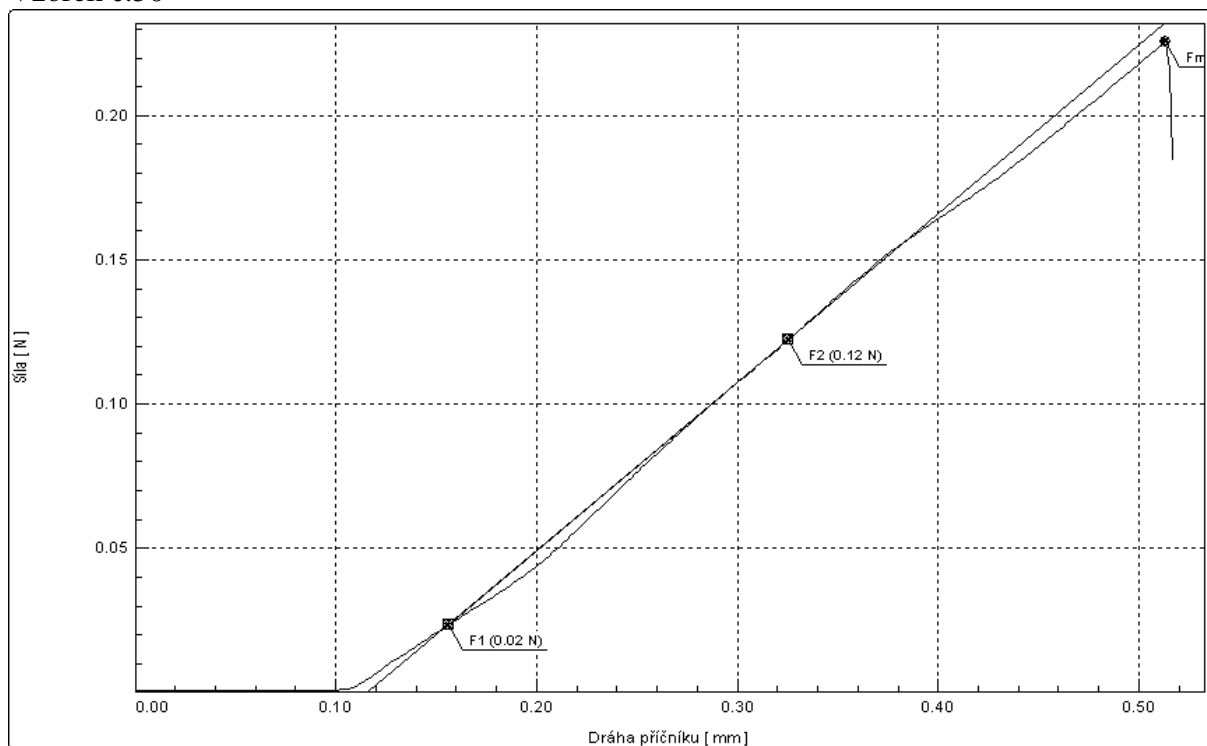
Vzorek č.48



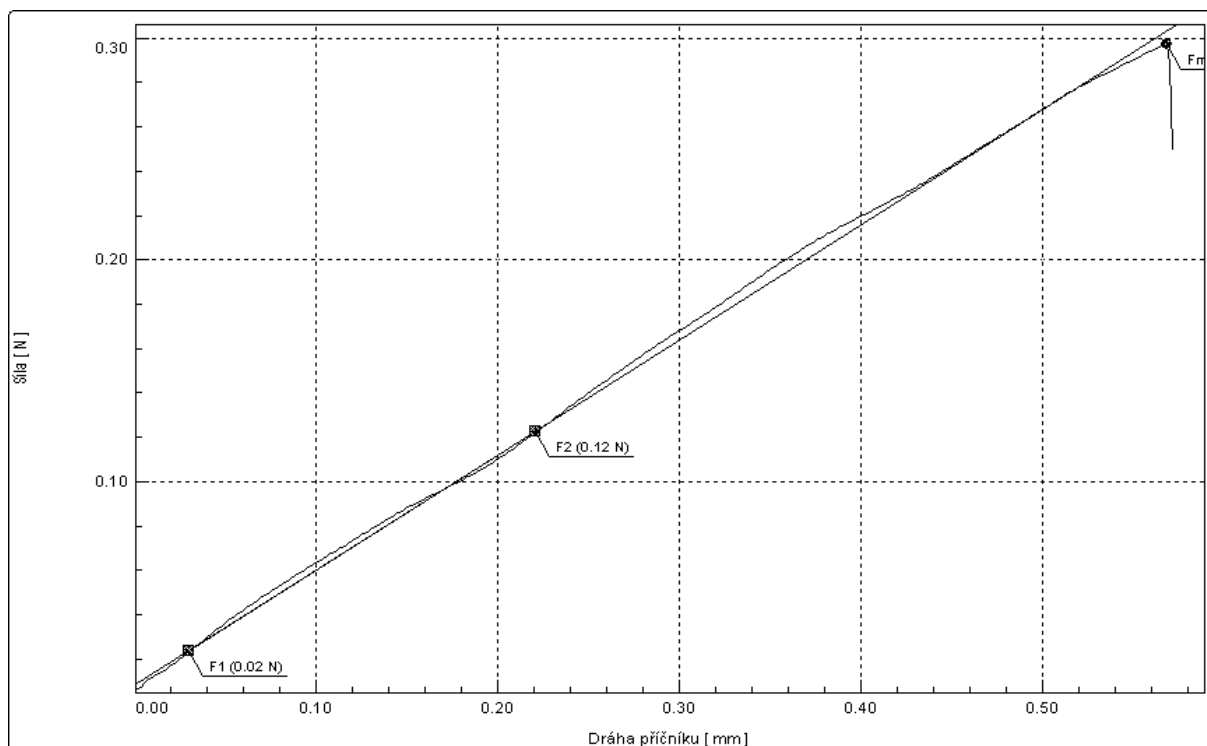
Vzorek č.49



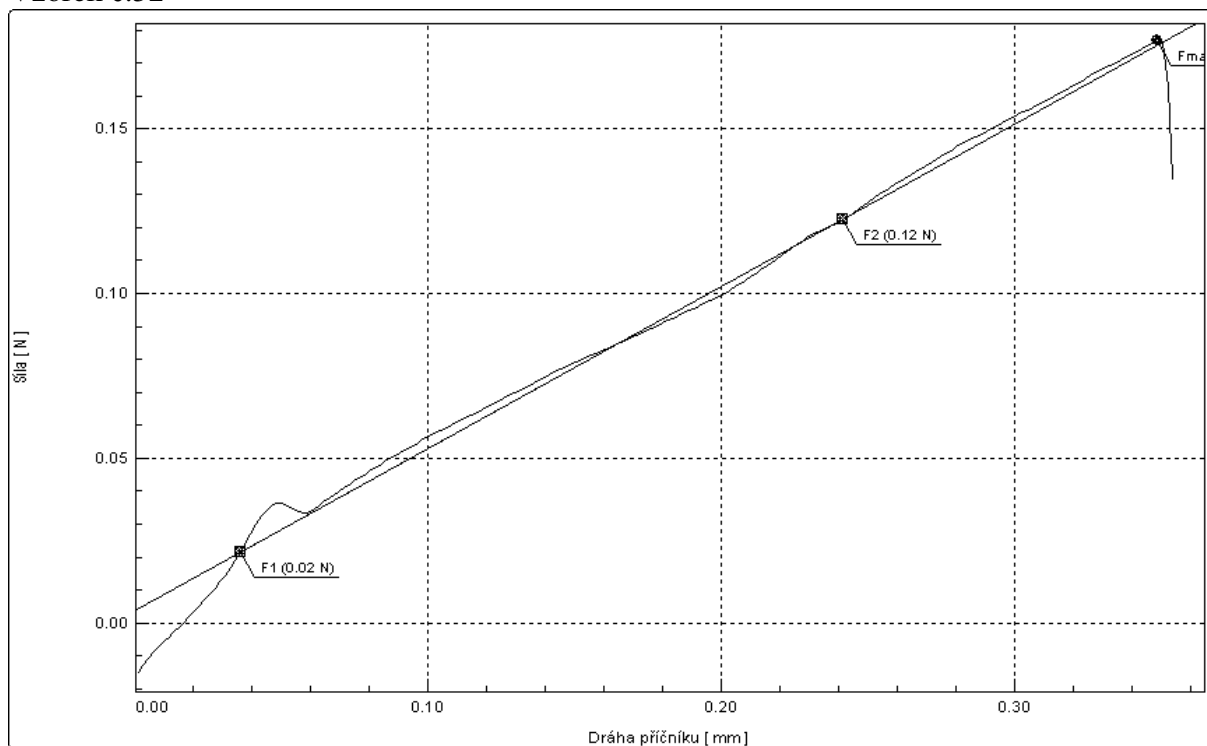
Vzorek č.50



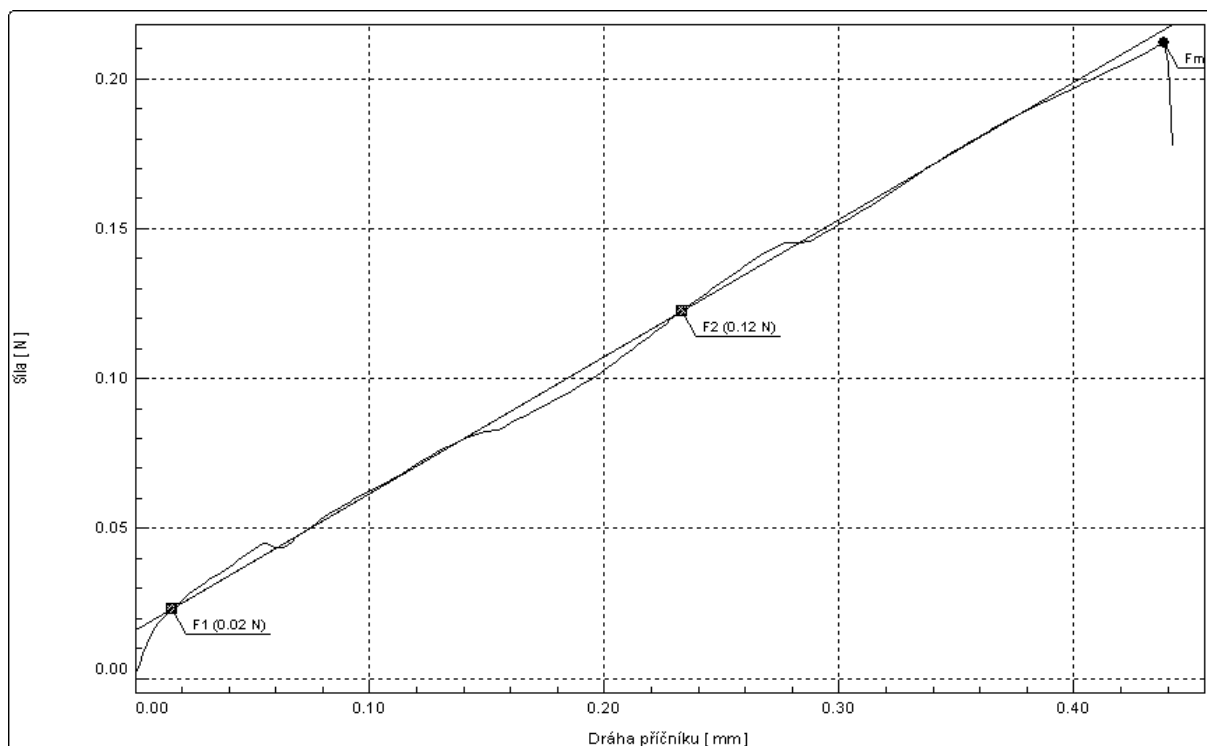
Vzorek č.51



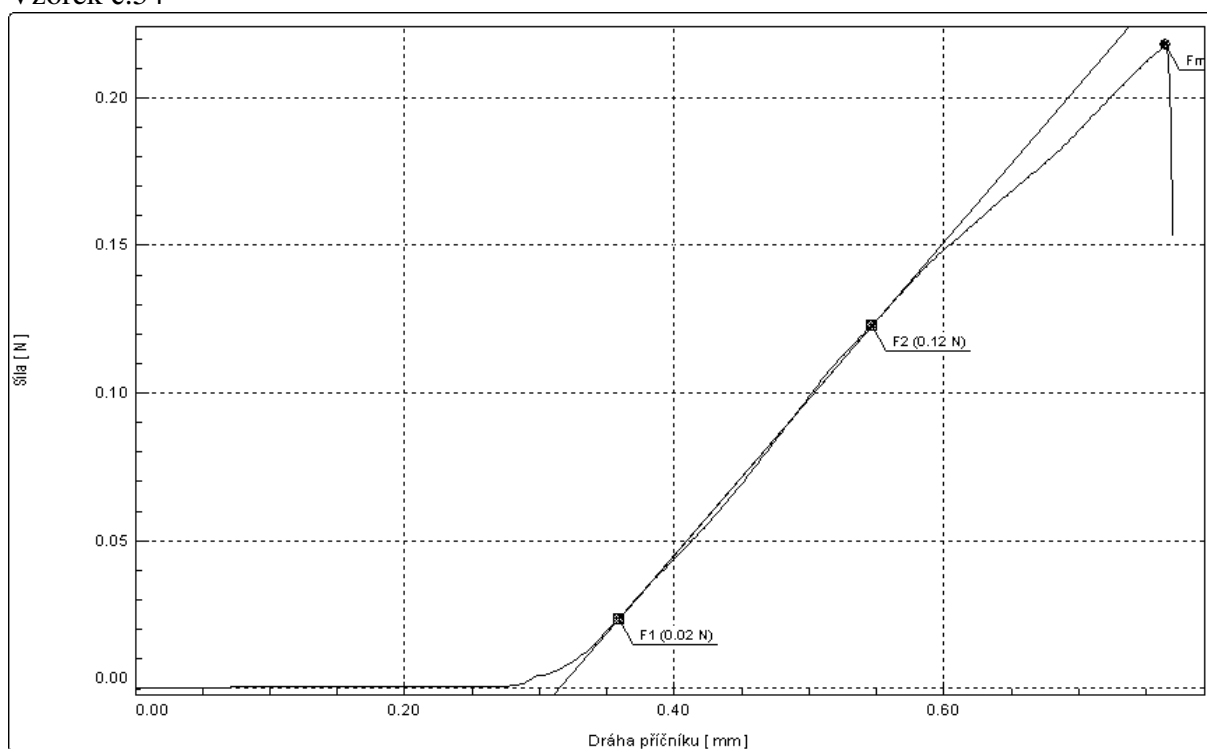
Vzorek č.52



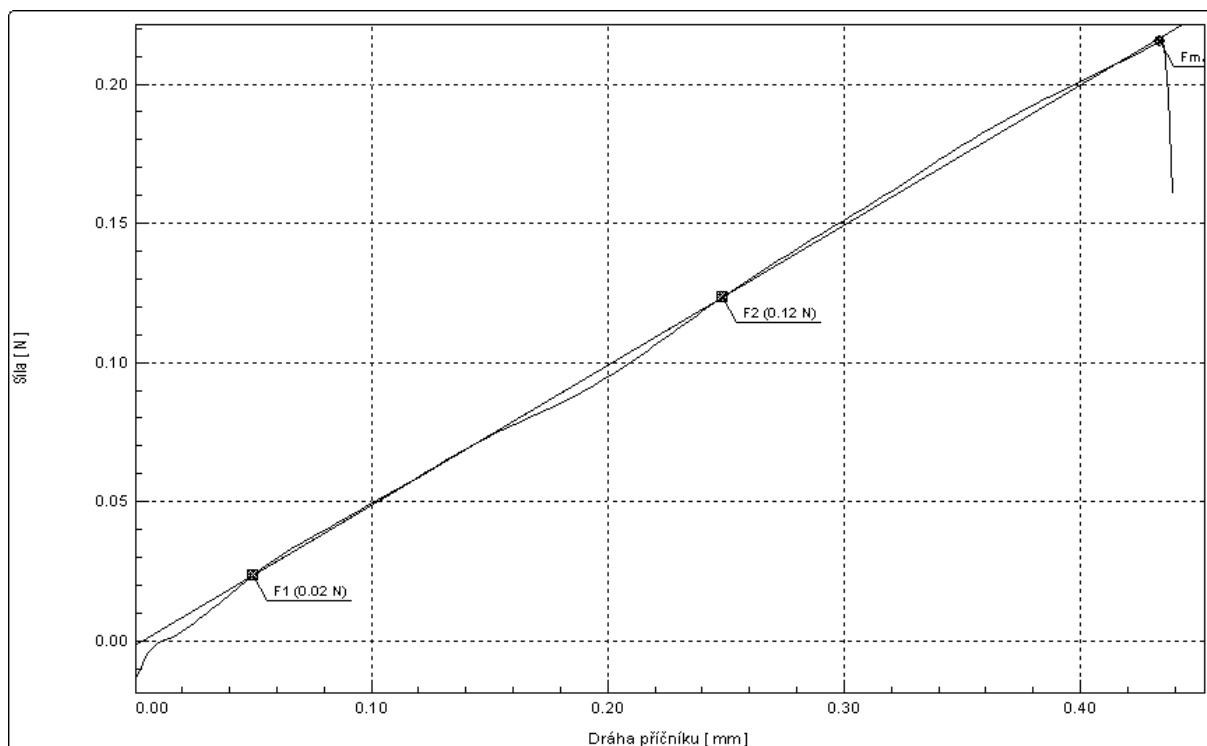
Vzorek č.53



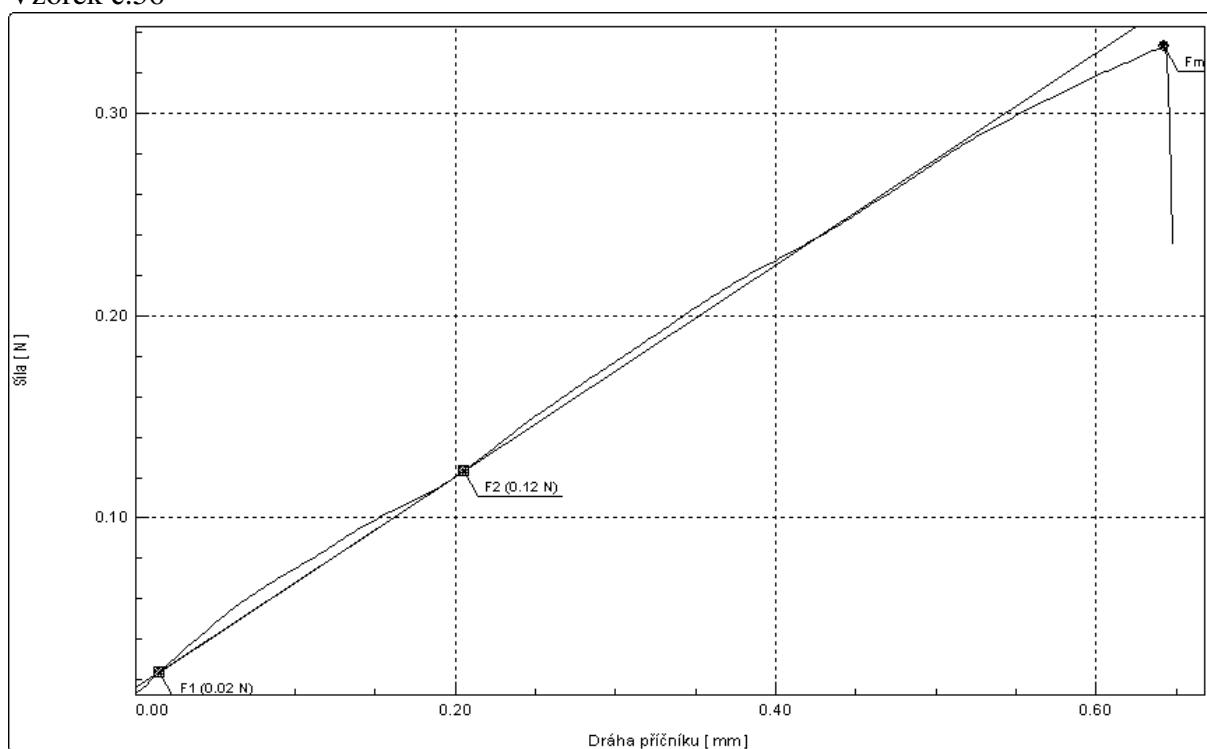
Vzorek č.54



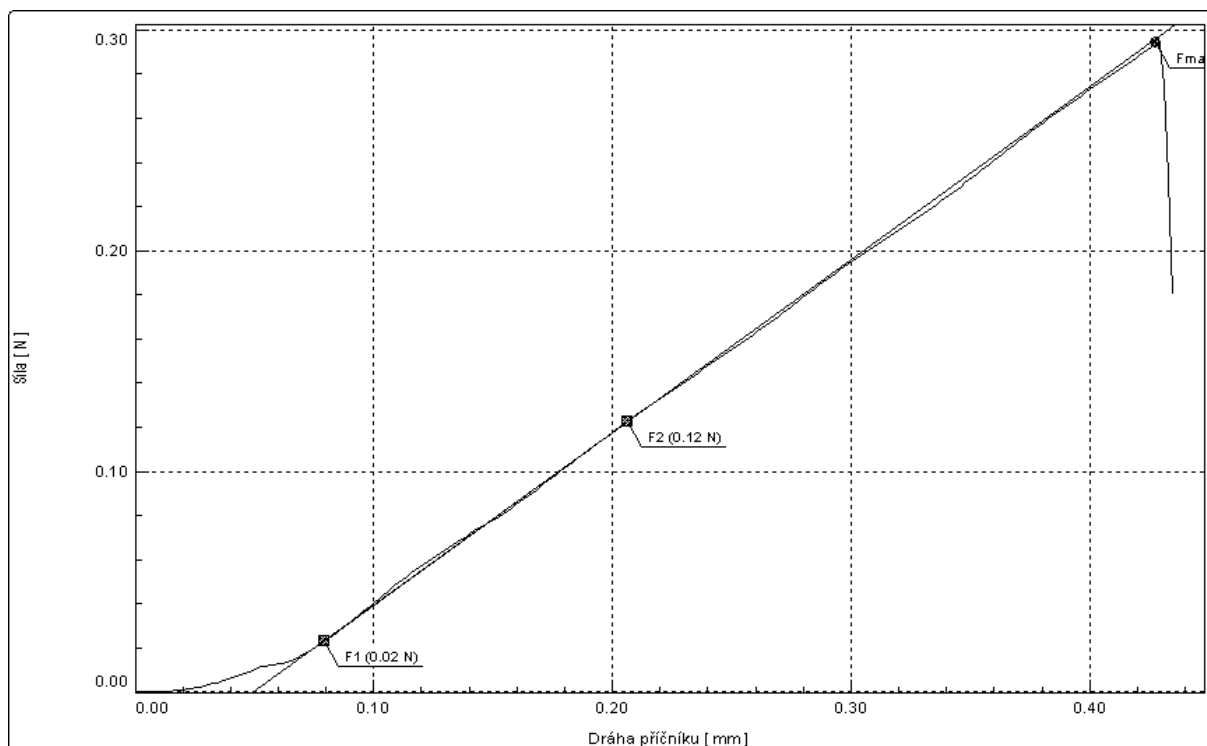
Vzorek č.55



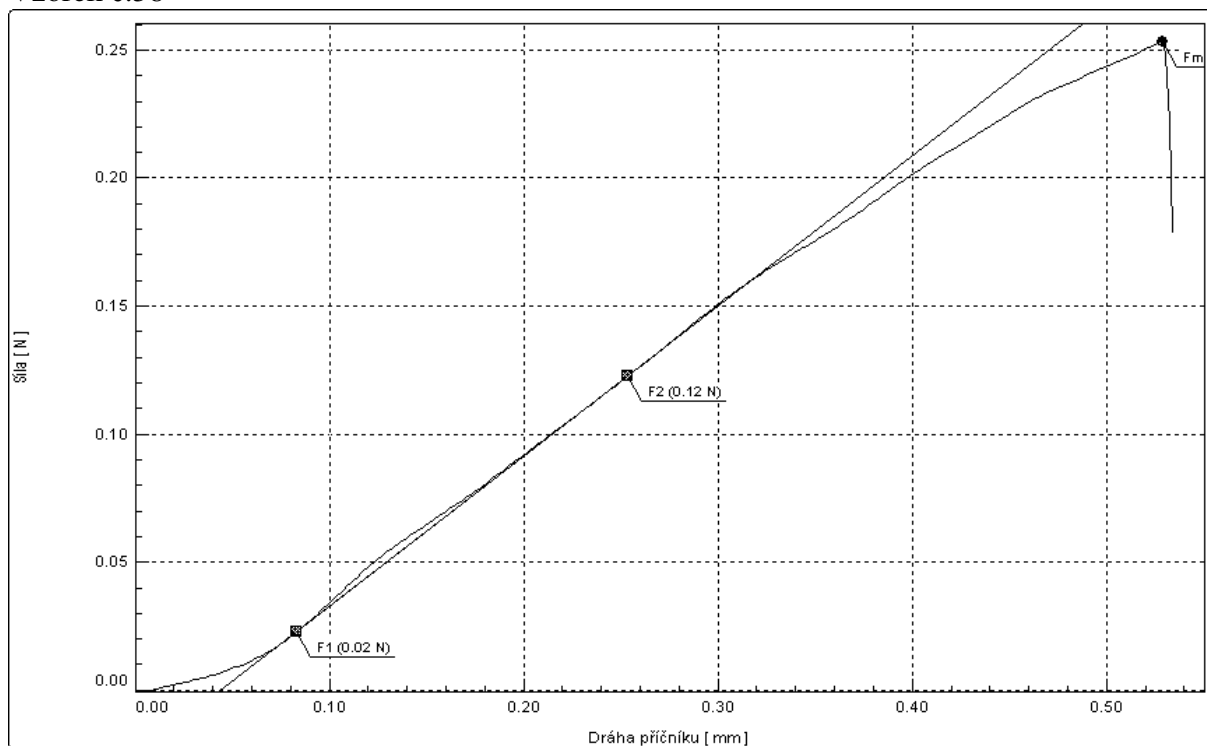
Vzorek č.56



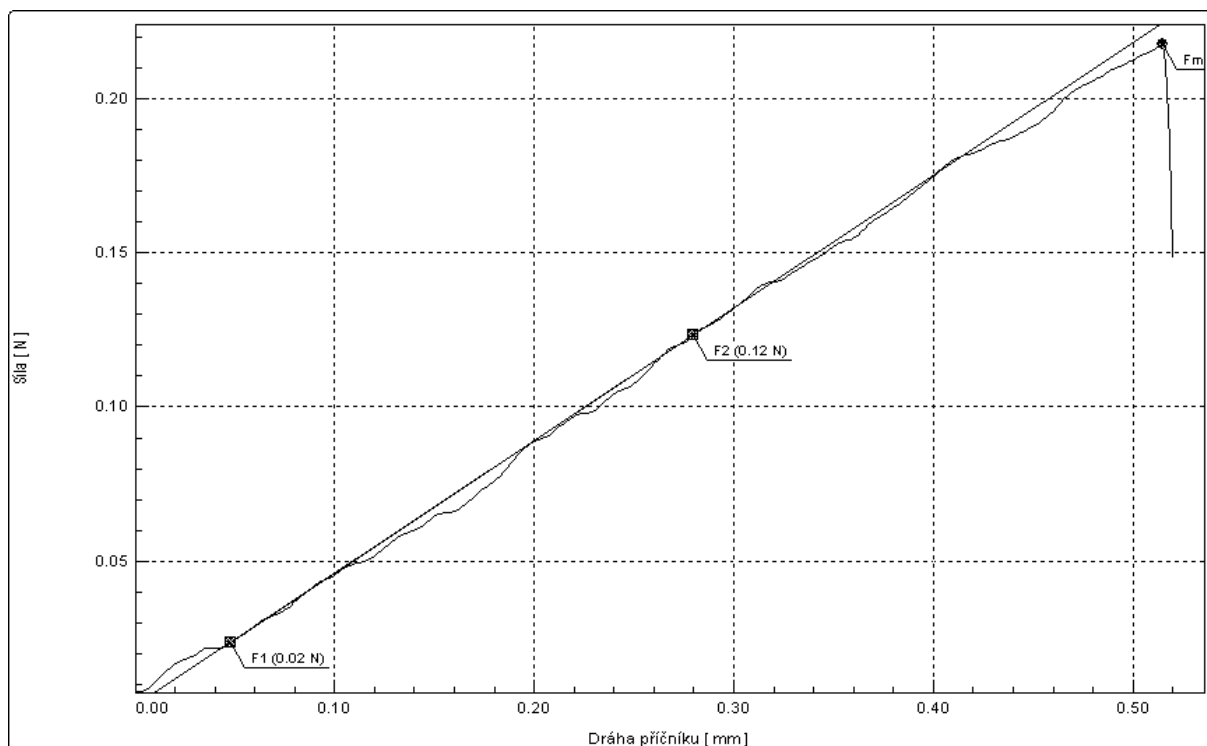
Vzorek č.57



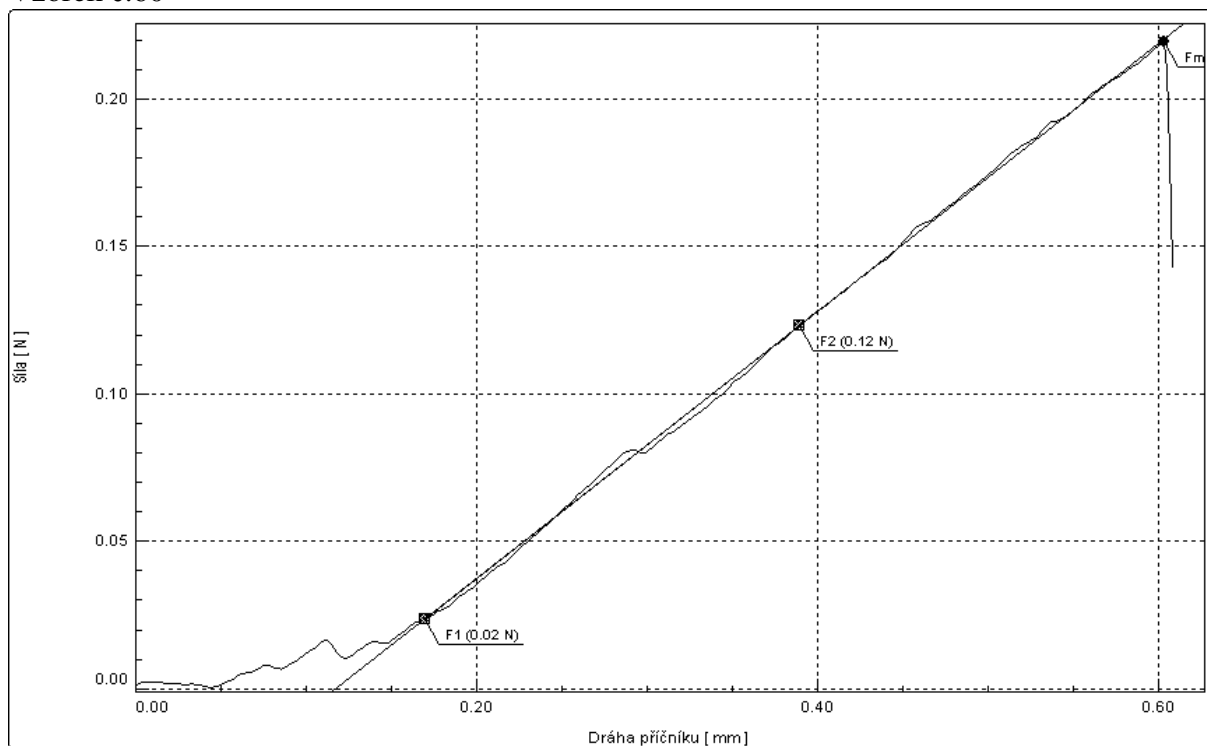
Vzorek č.58



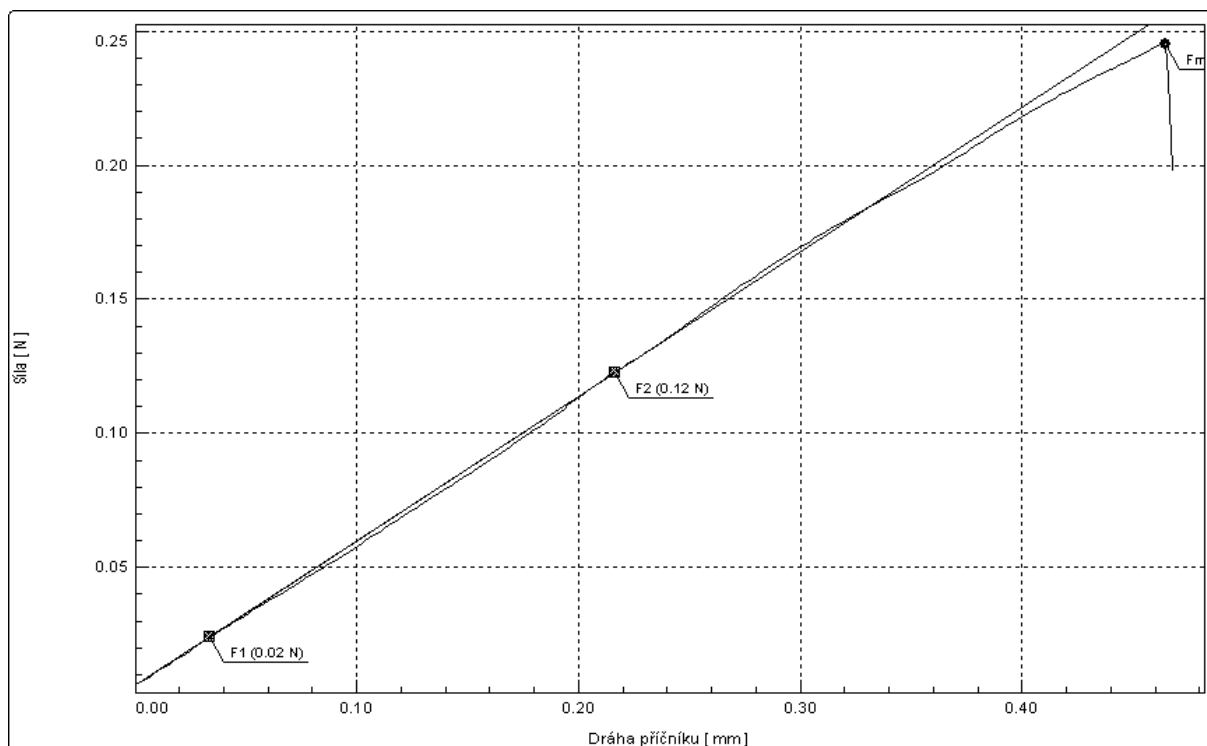
Vzorek č.59



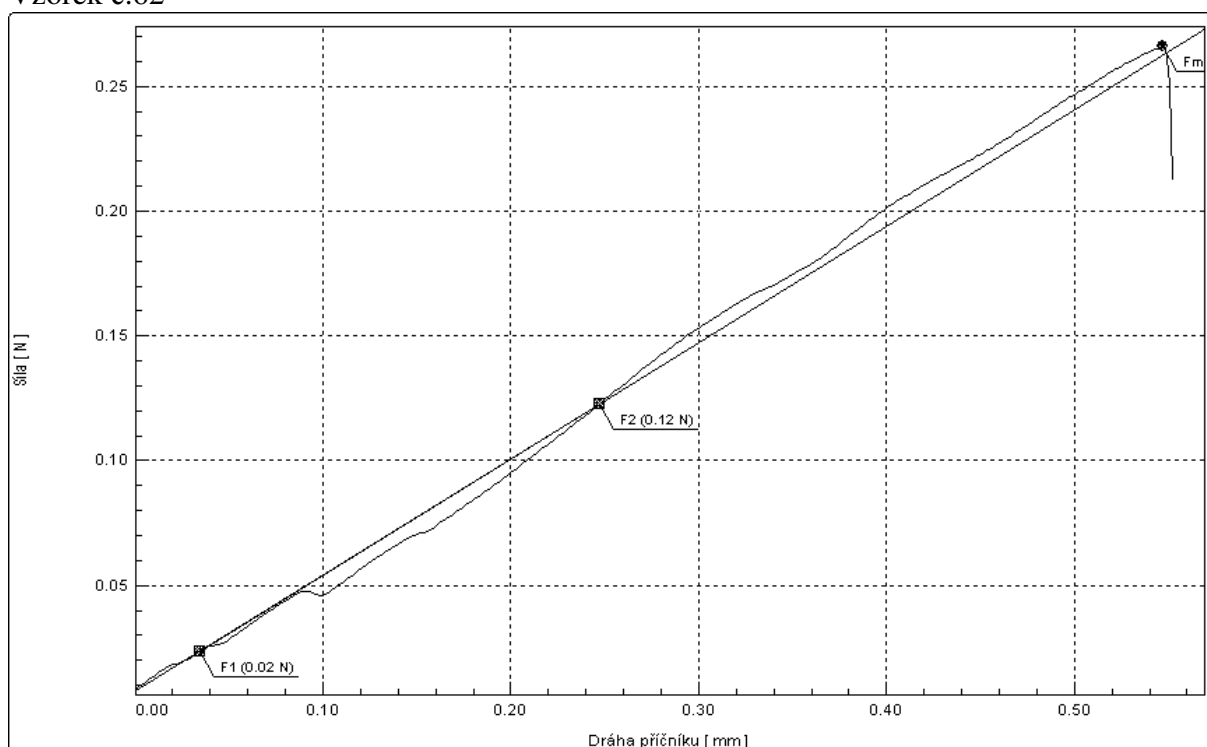
Vzorek č.60



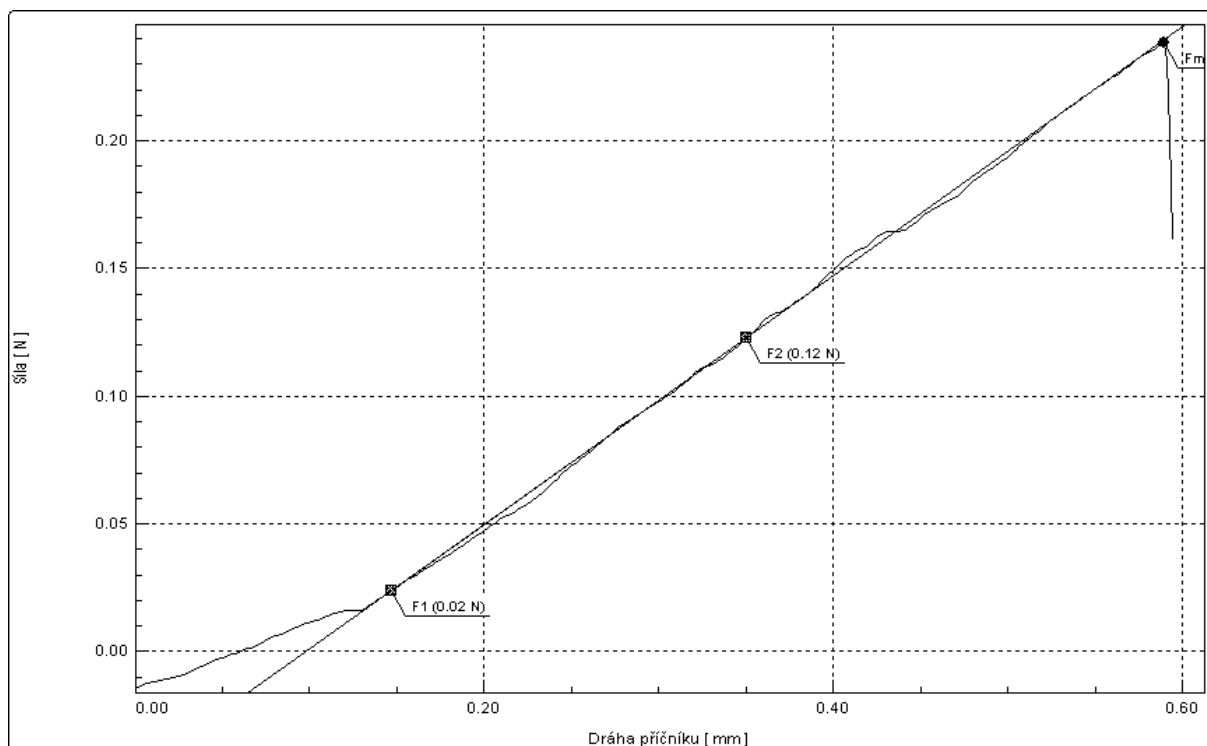
Vzorek č.61



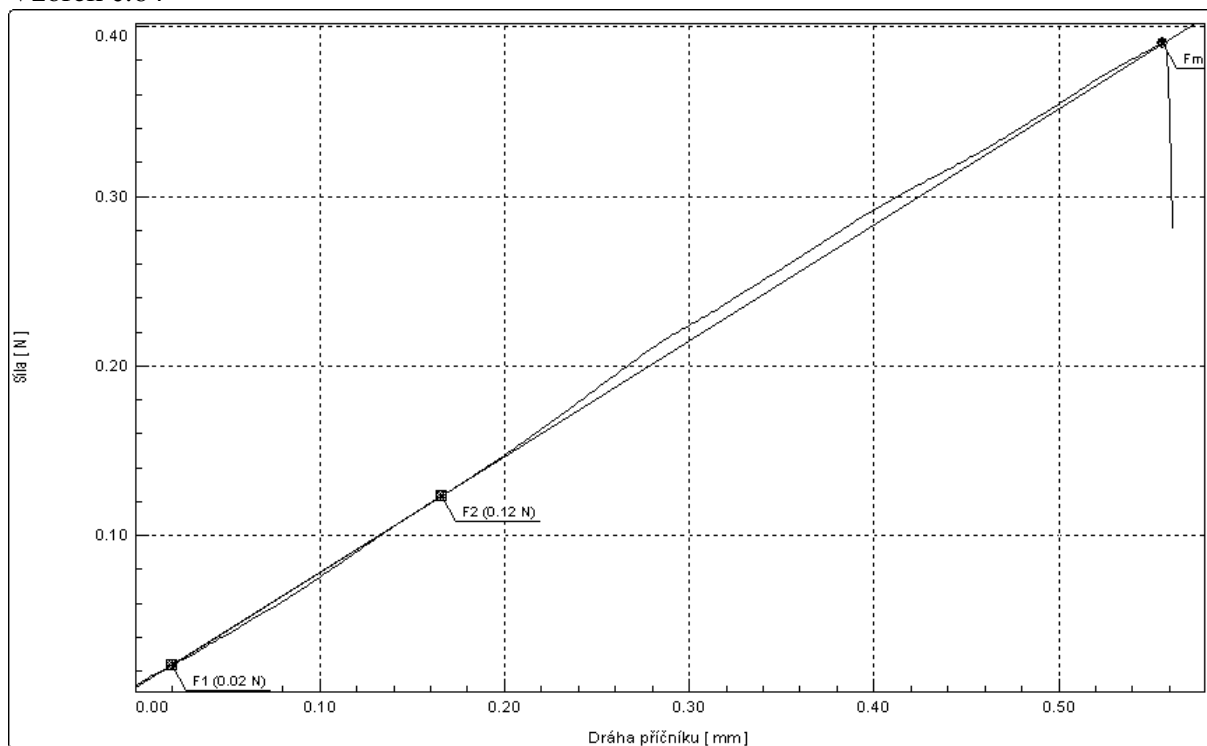
Vzorek č.62



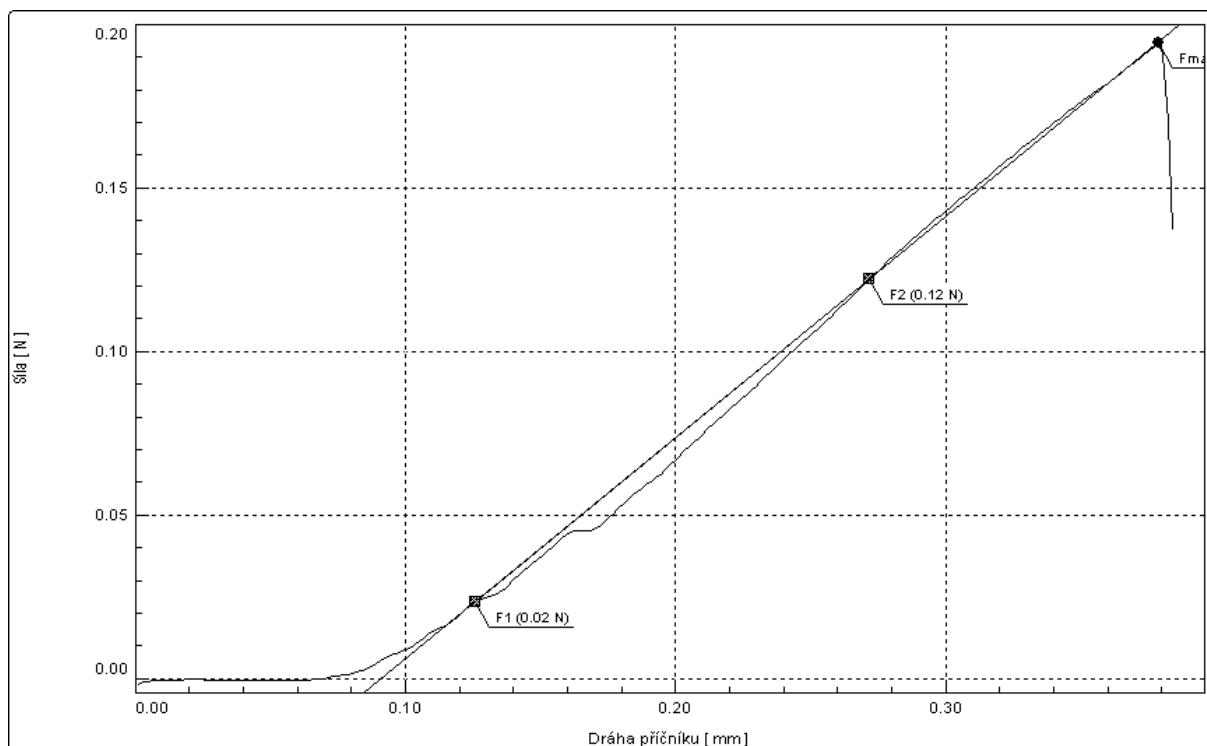
Vzorek č.63



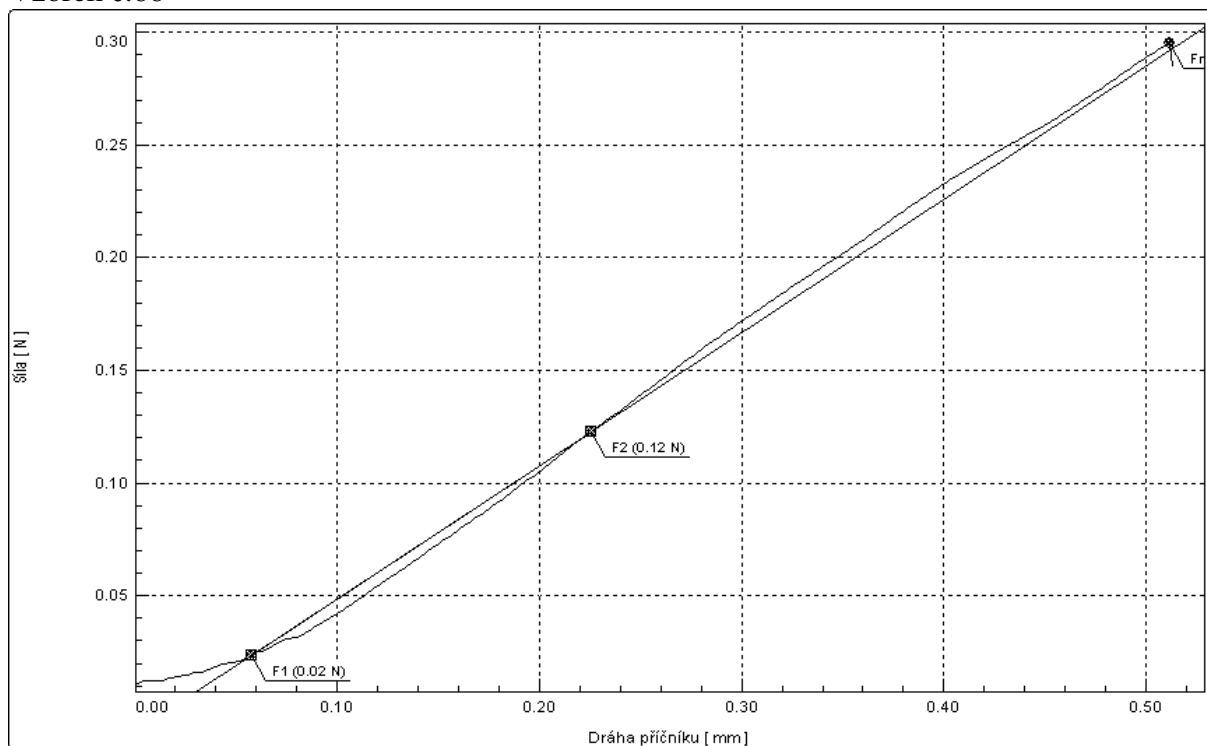
Vzorek č.64



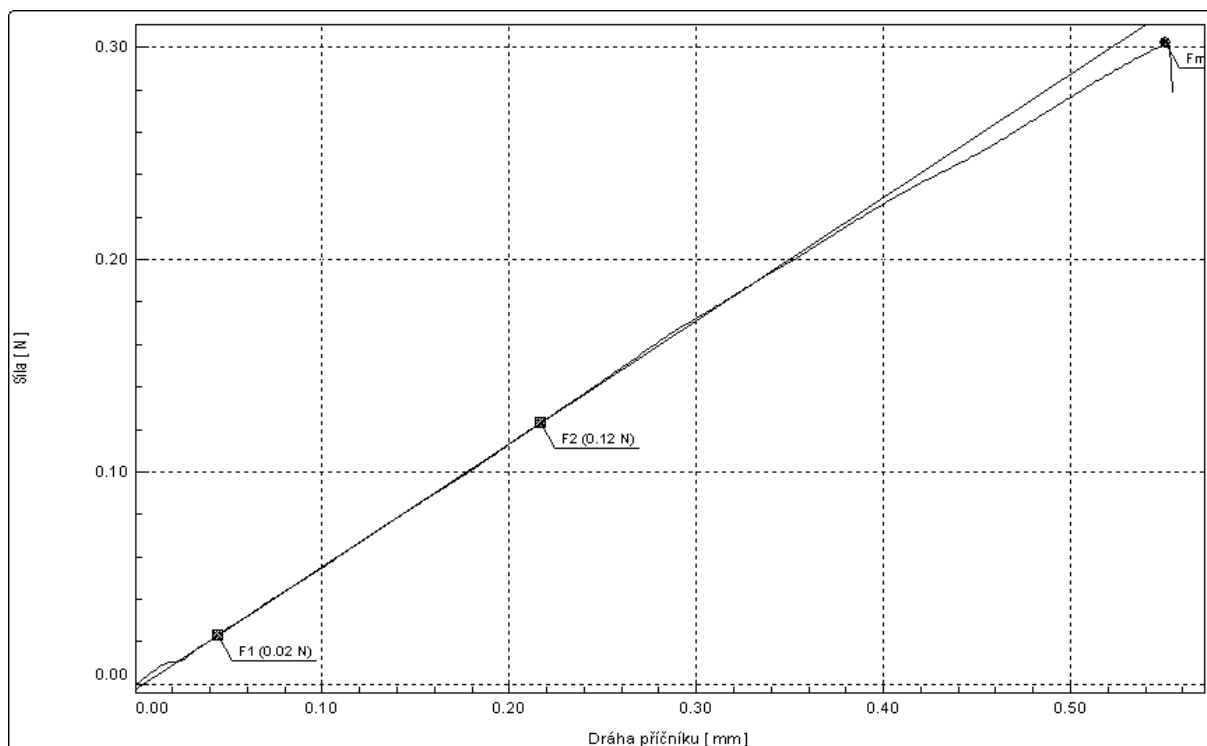
Vzorek č.65



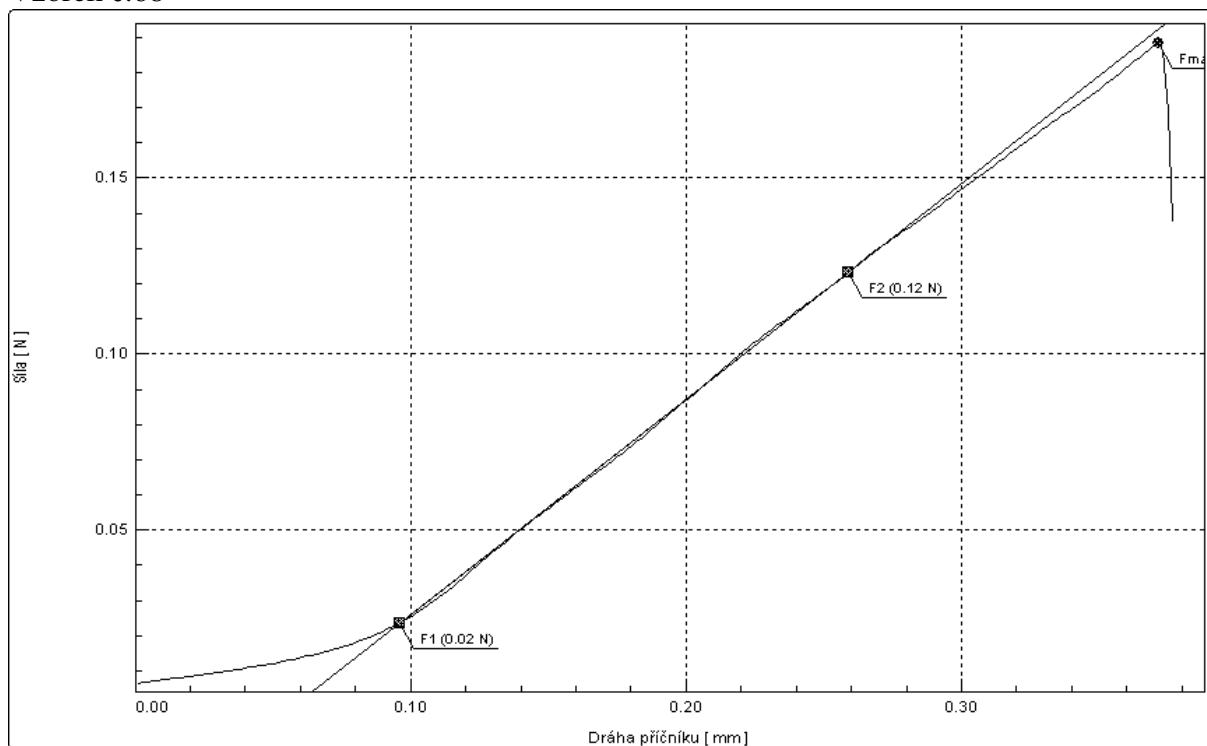
Vzorek č.66



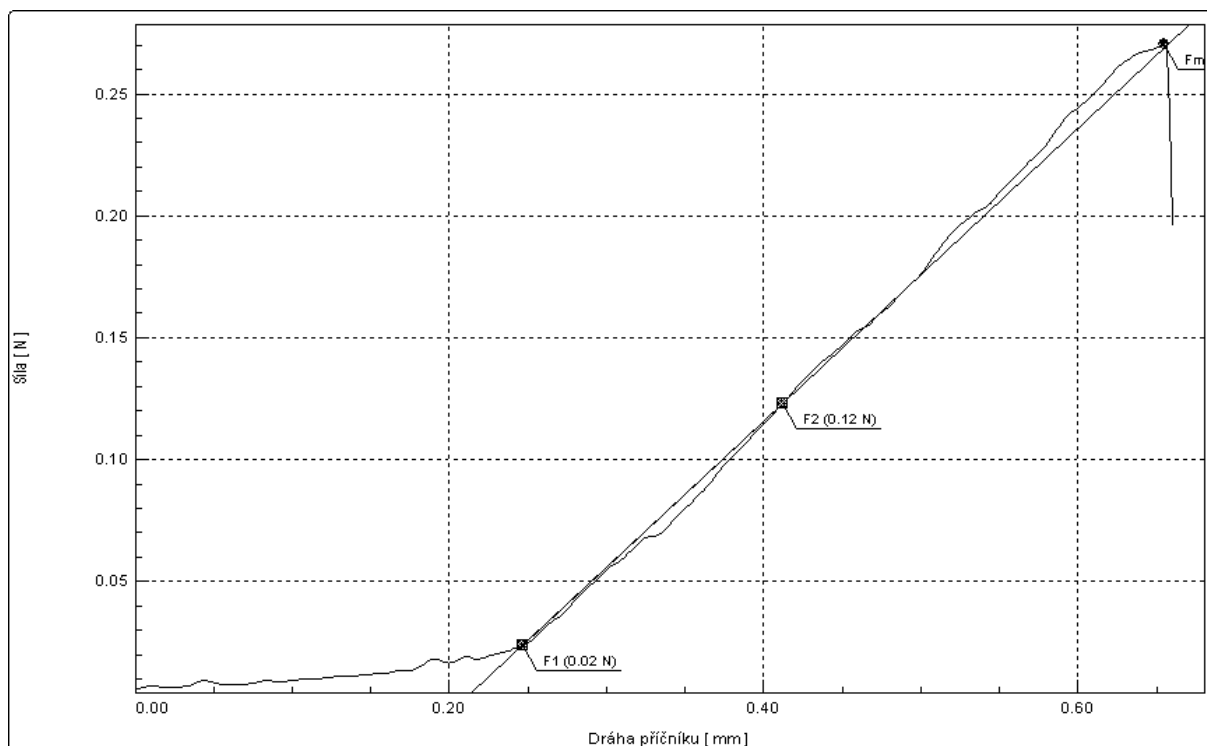
Vzorek č.67



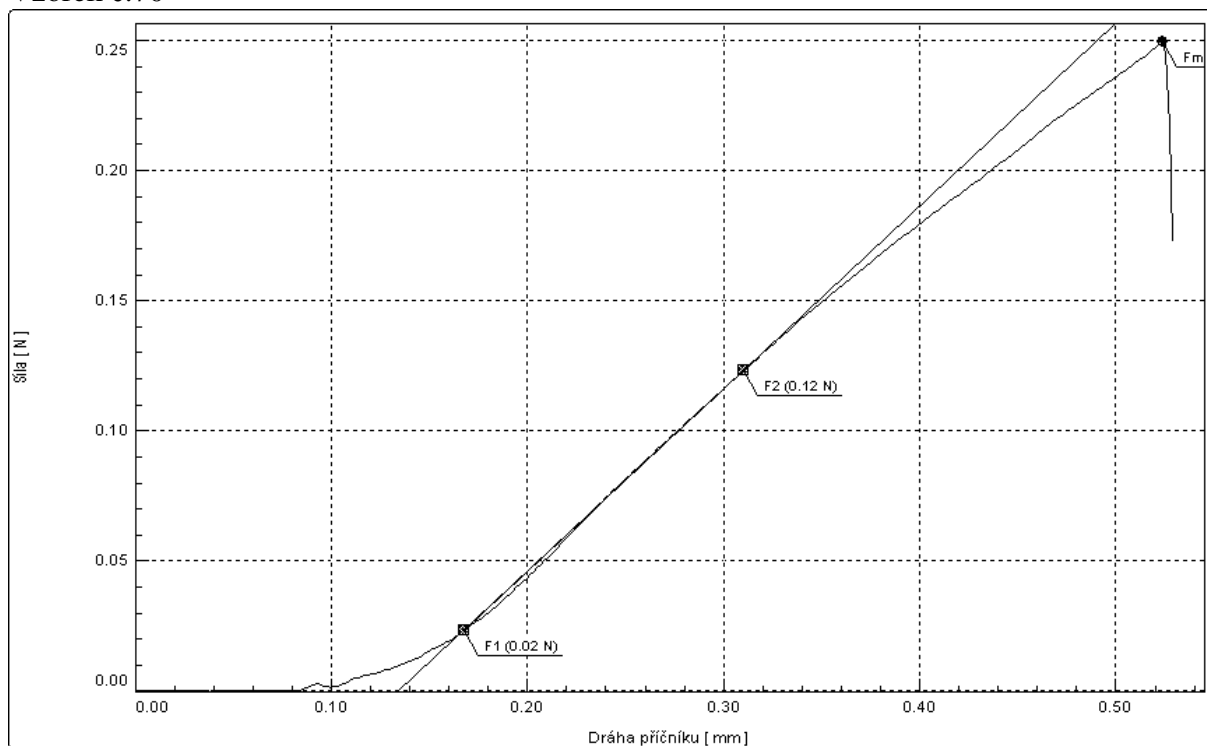
Vzorek č.68



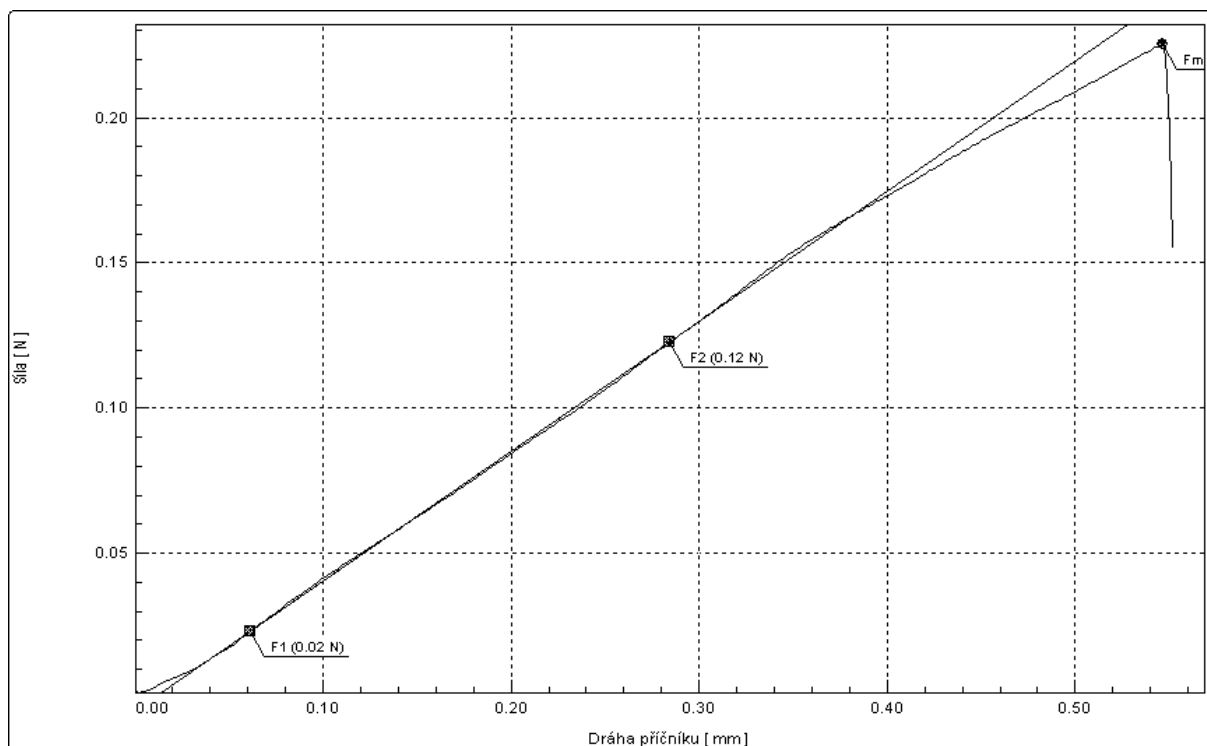
Vzorek č.69



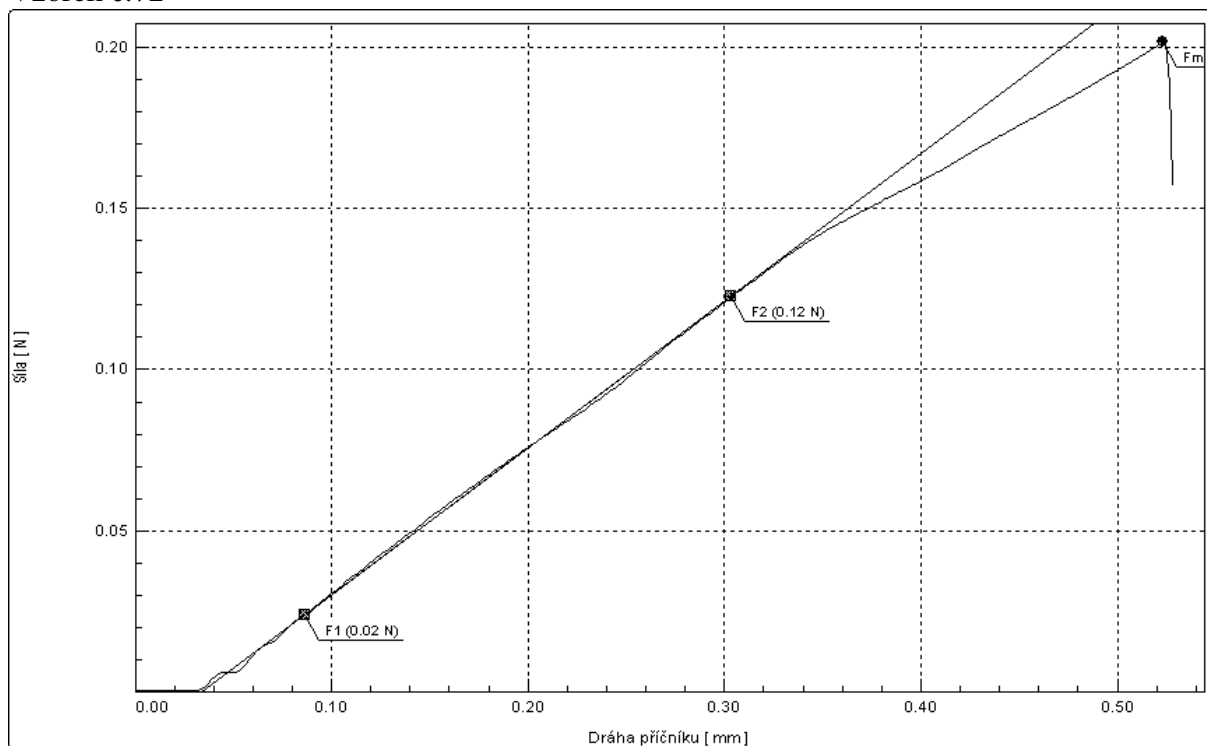
Vzorek č.70



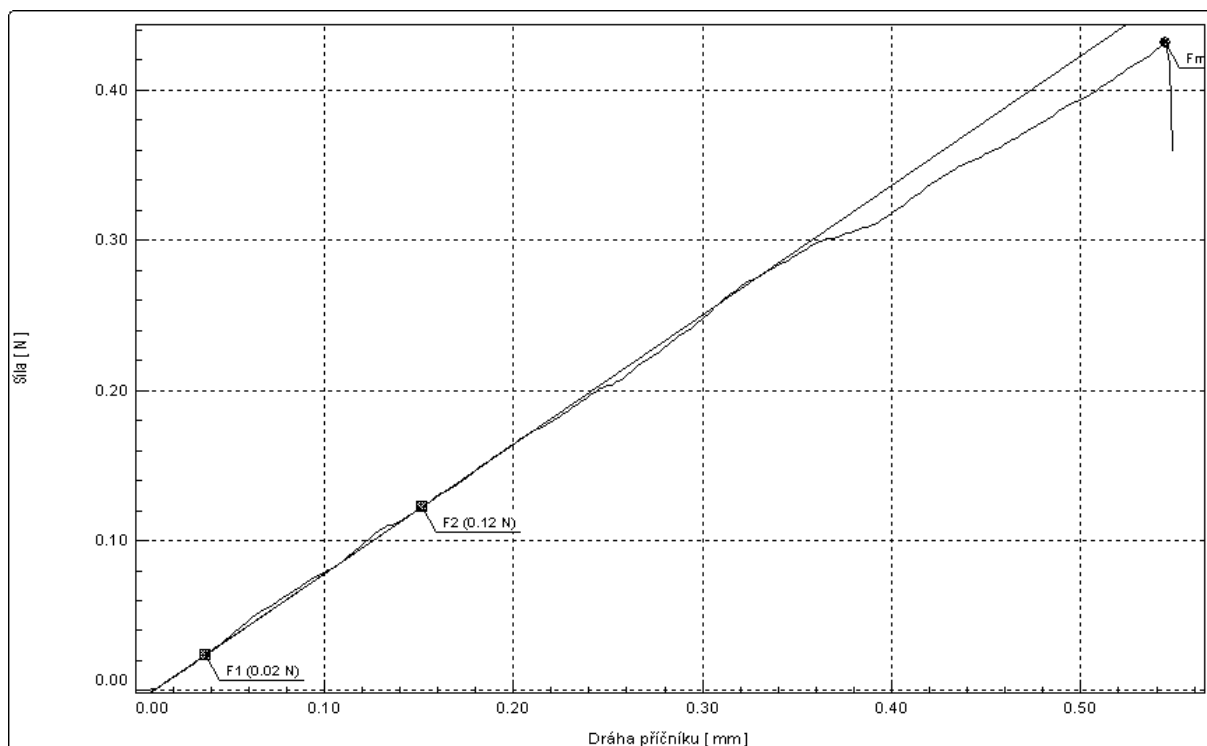
Vzorek č.71



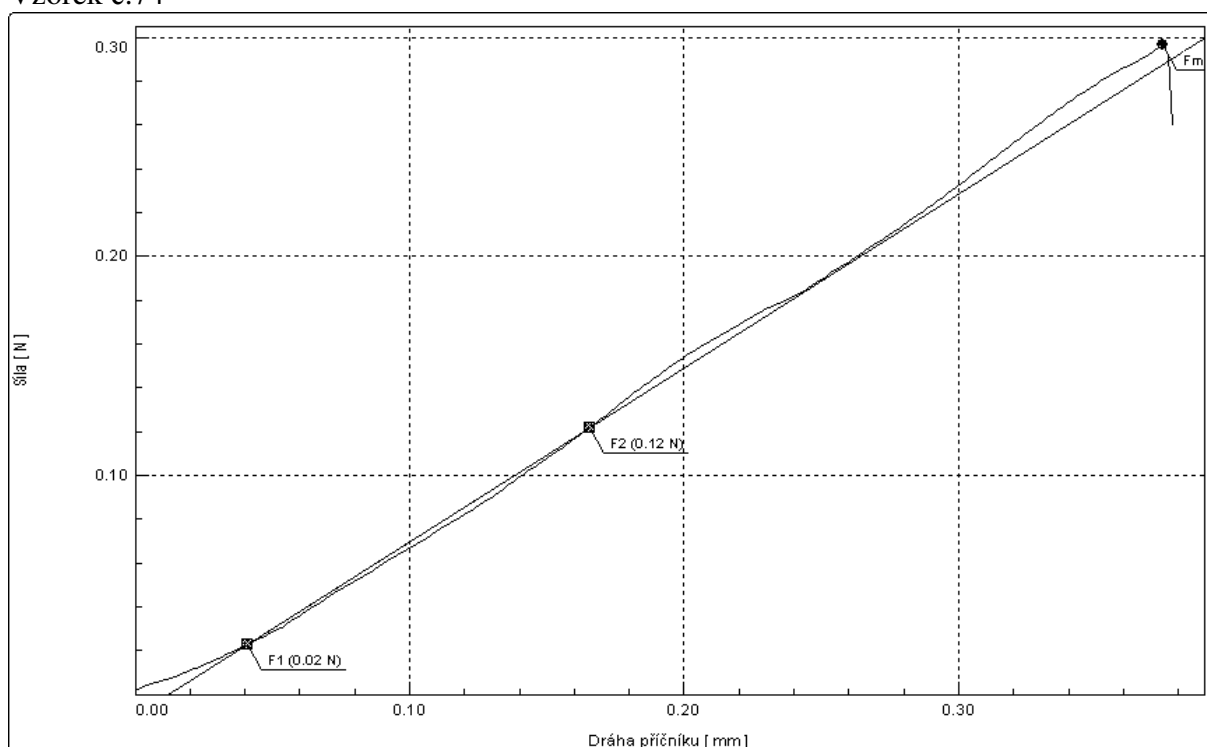
Vzorek č.72



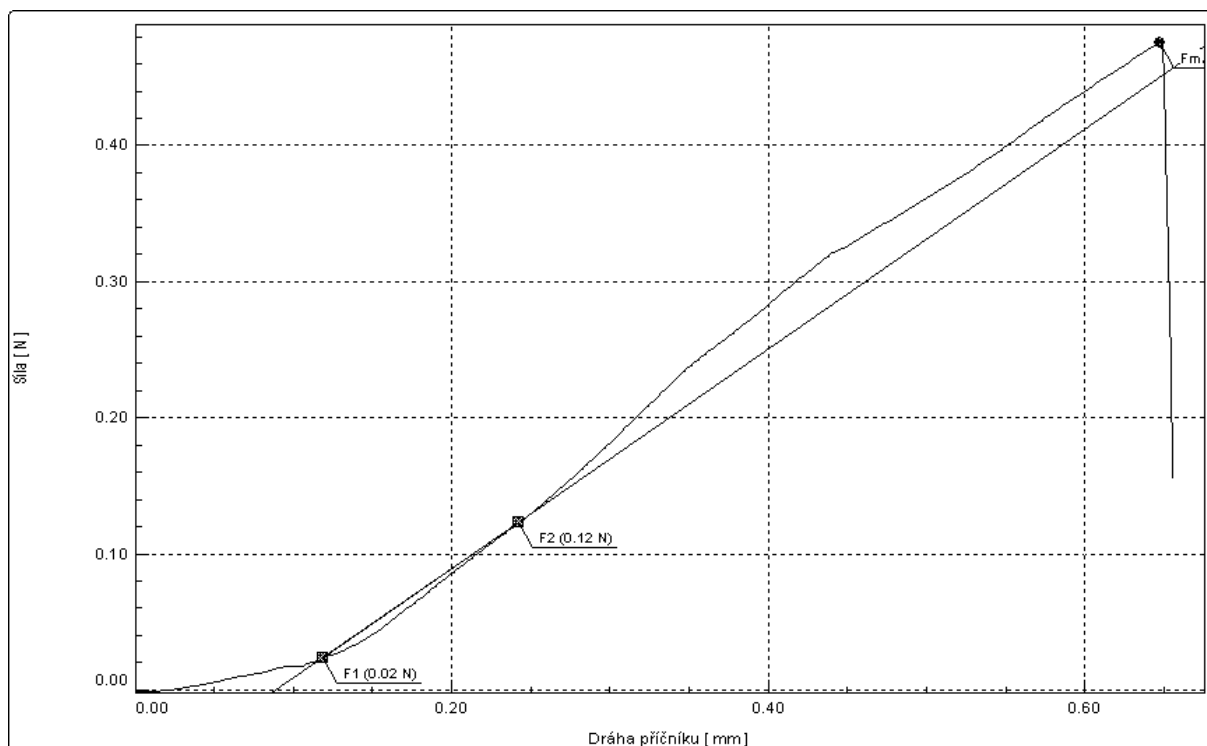
Vzorek č.73



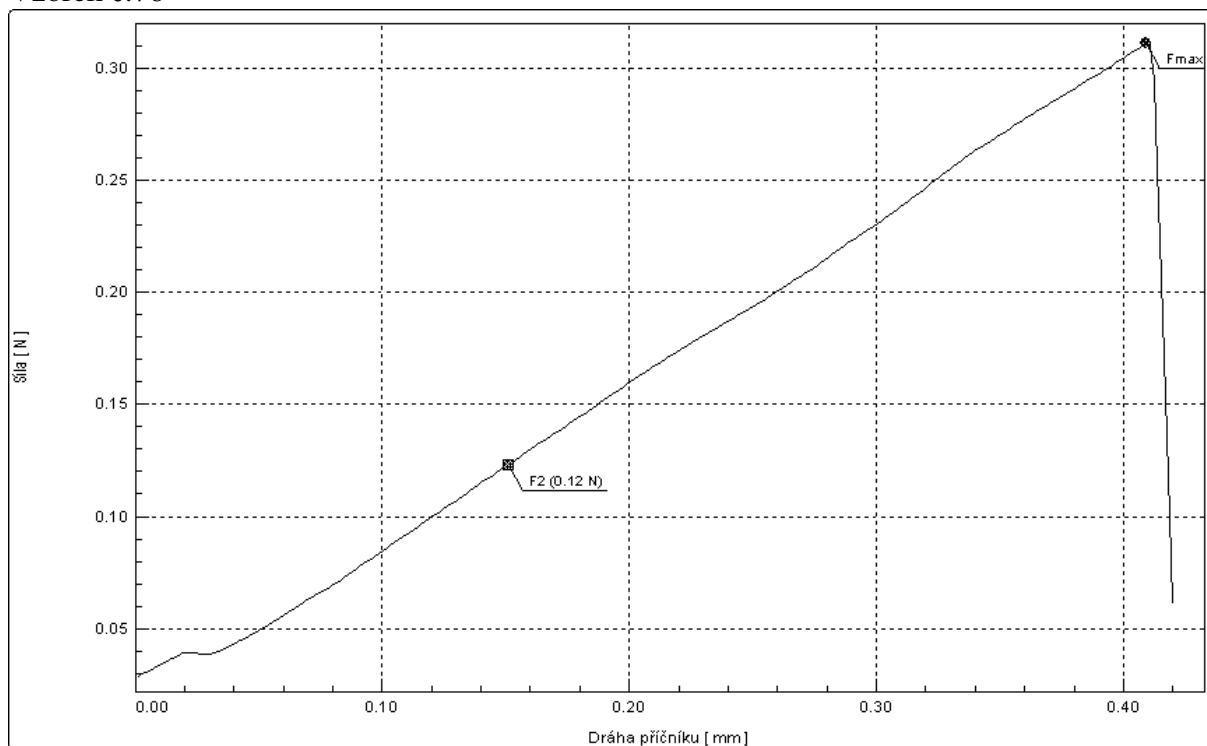
Vzorek č.74



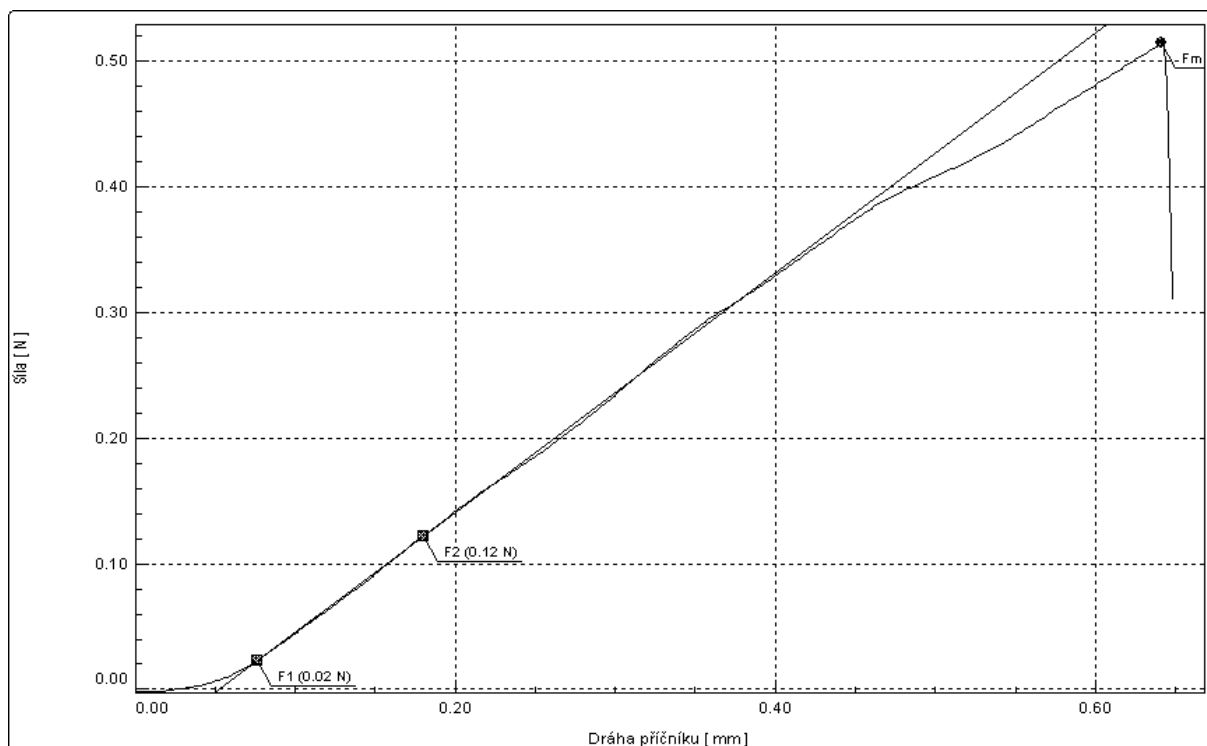
Vzorek č.75



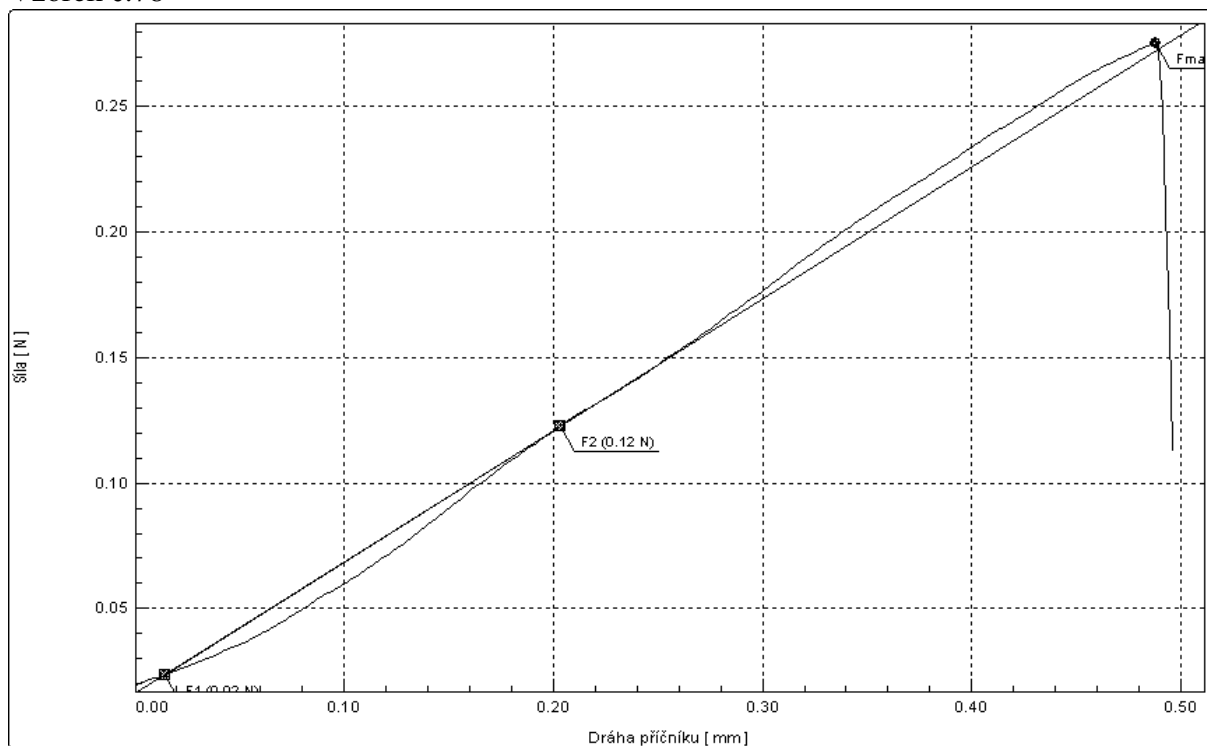
Vzorek č.76



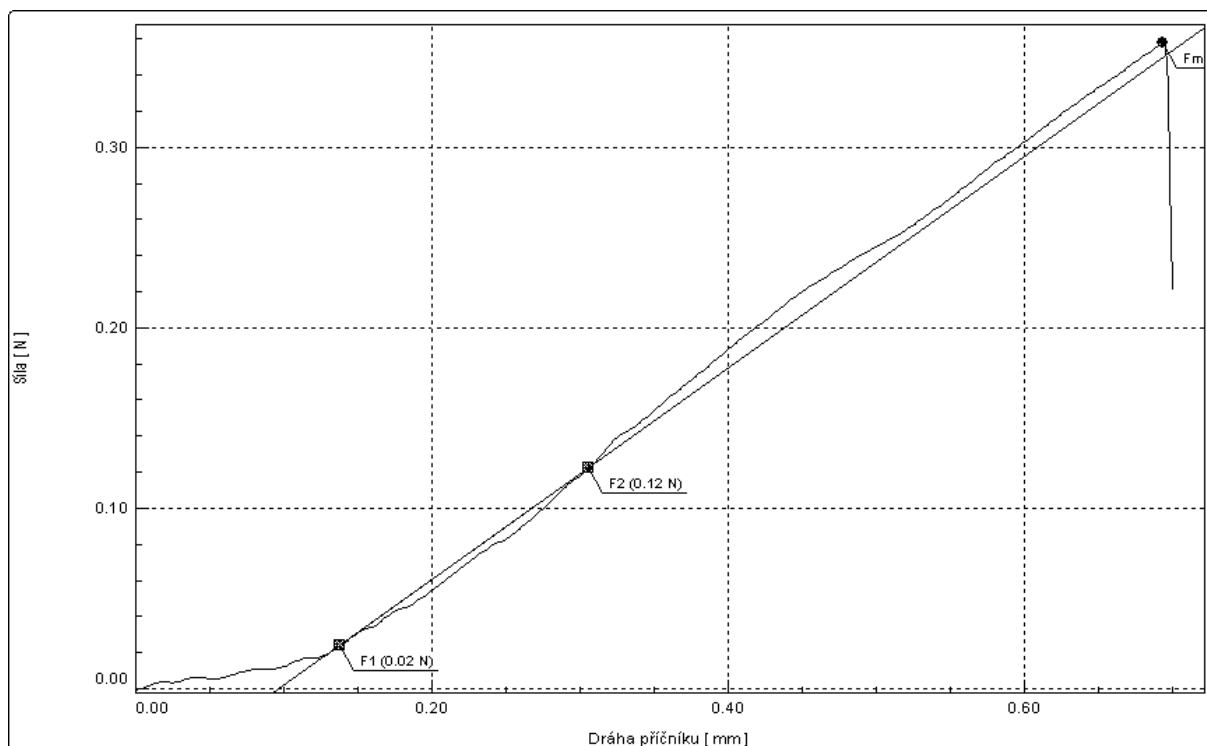
Vzorek č.77



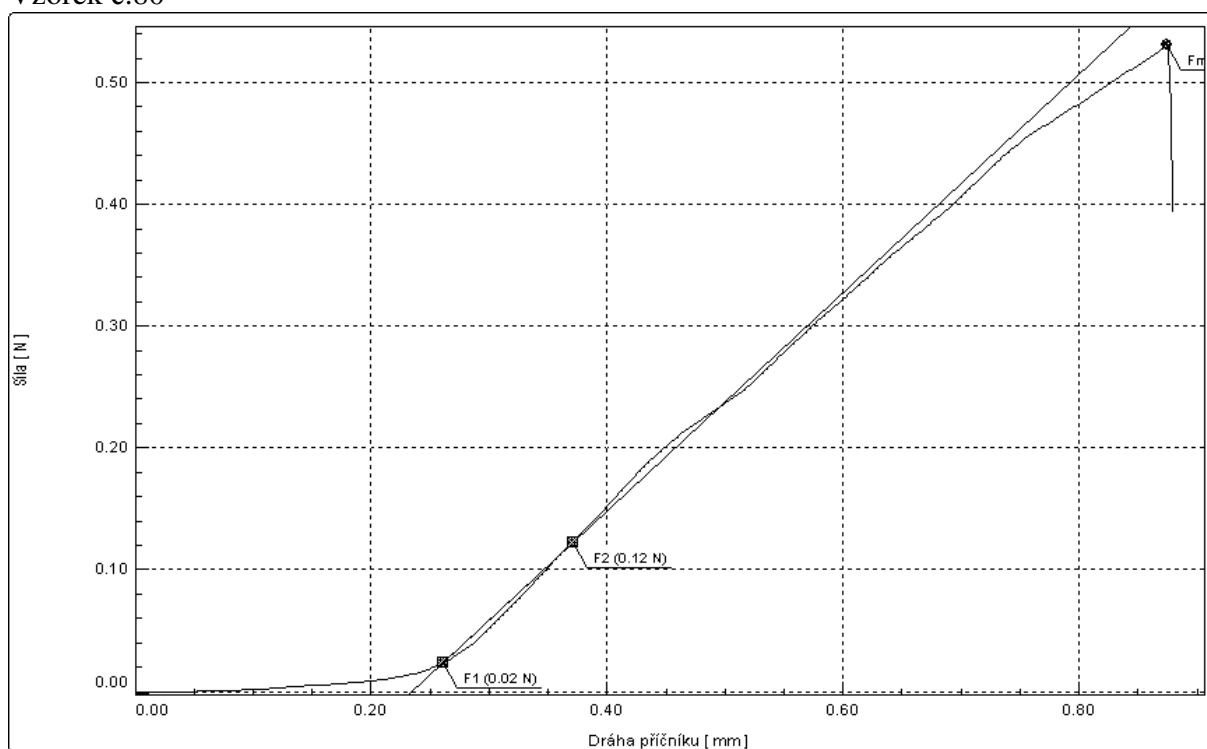
Vzorek č.78



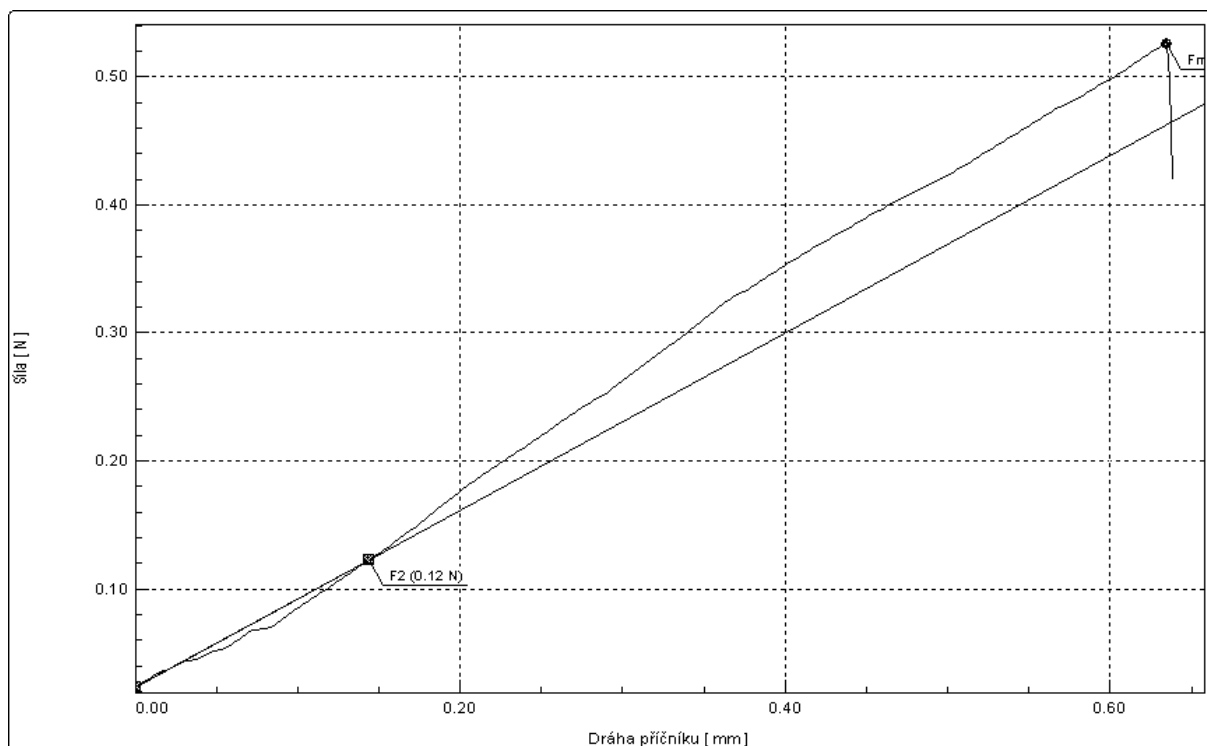
Vzorek č.79



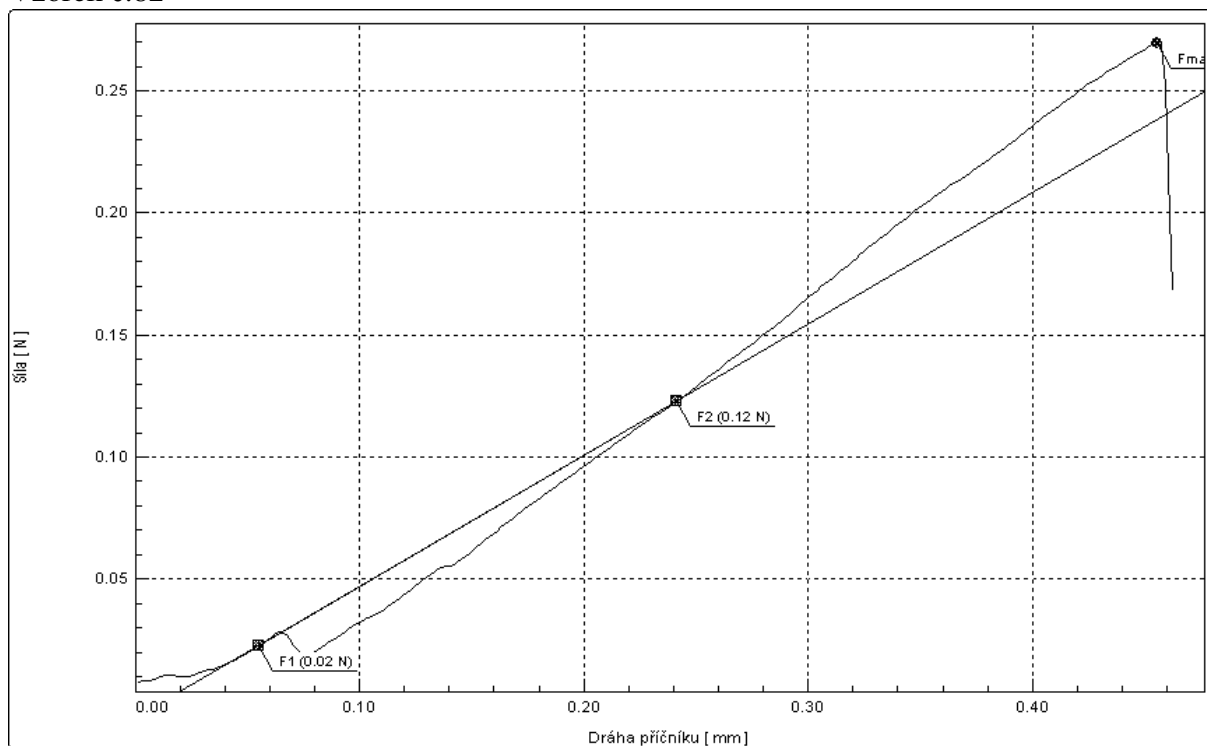
Vzorek č.80



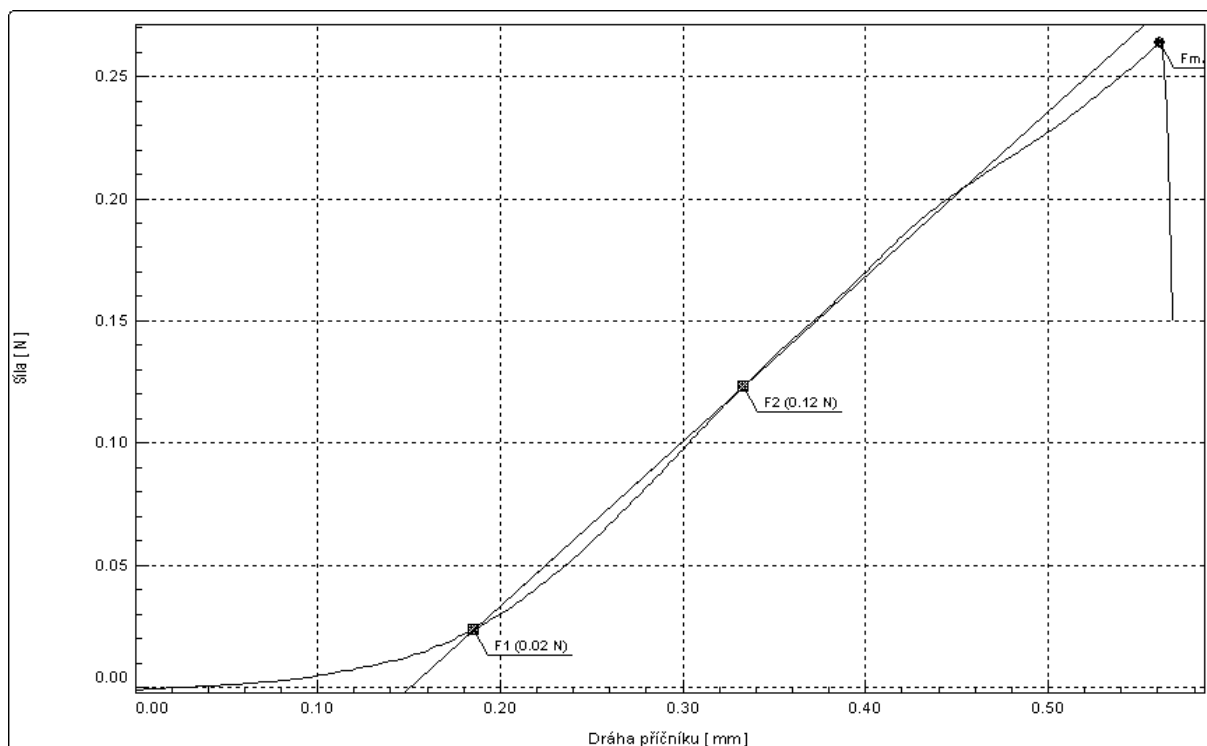
Vzorek č.81



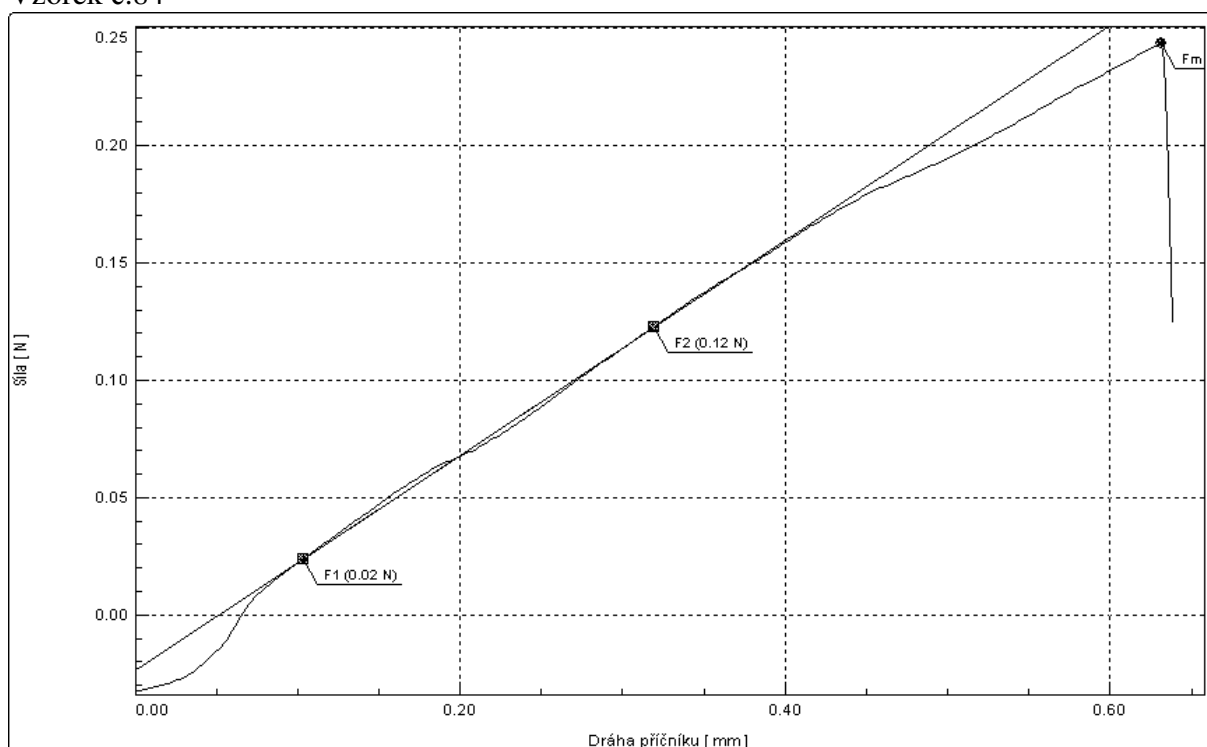
Vzorek č.82



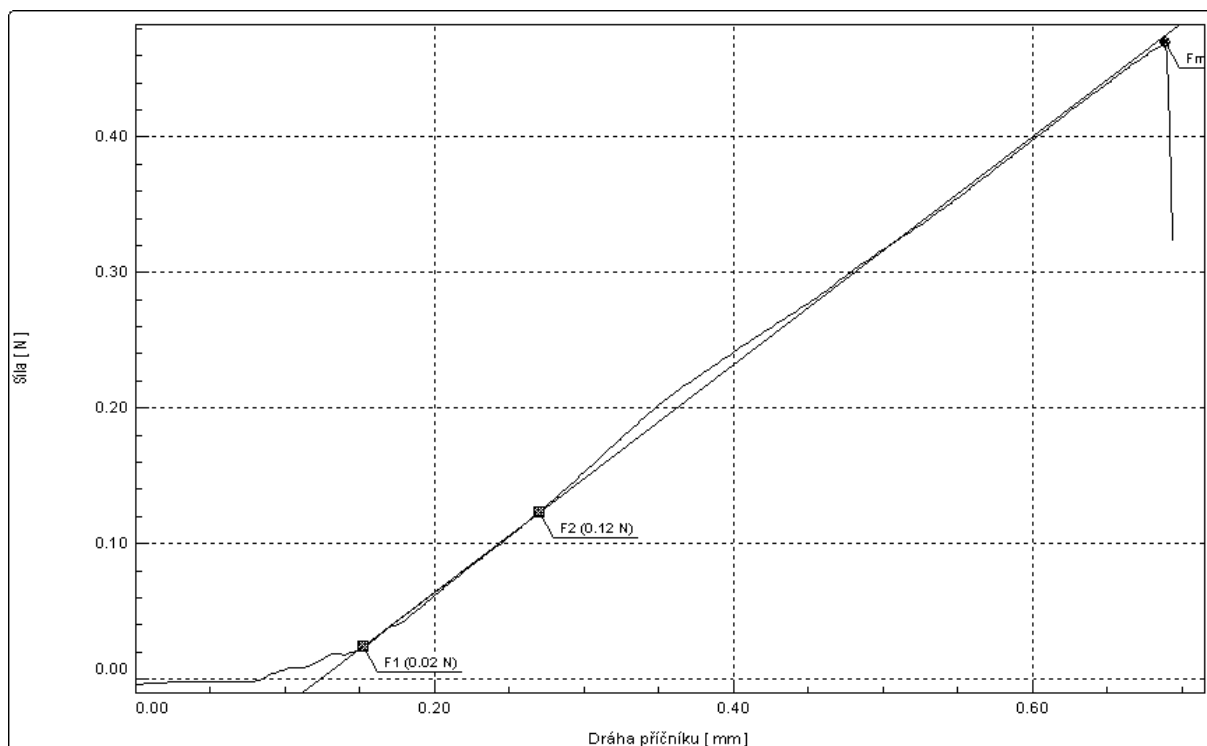
Vzorek č.83



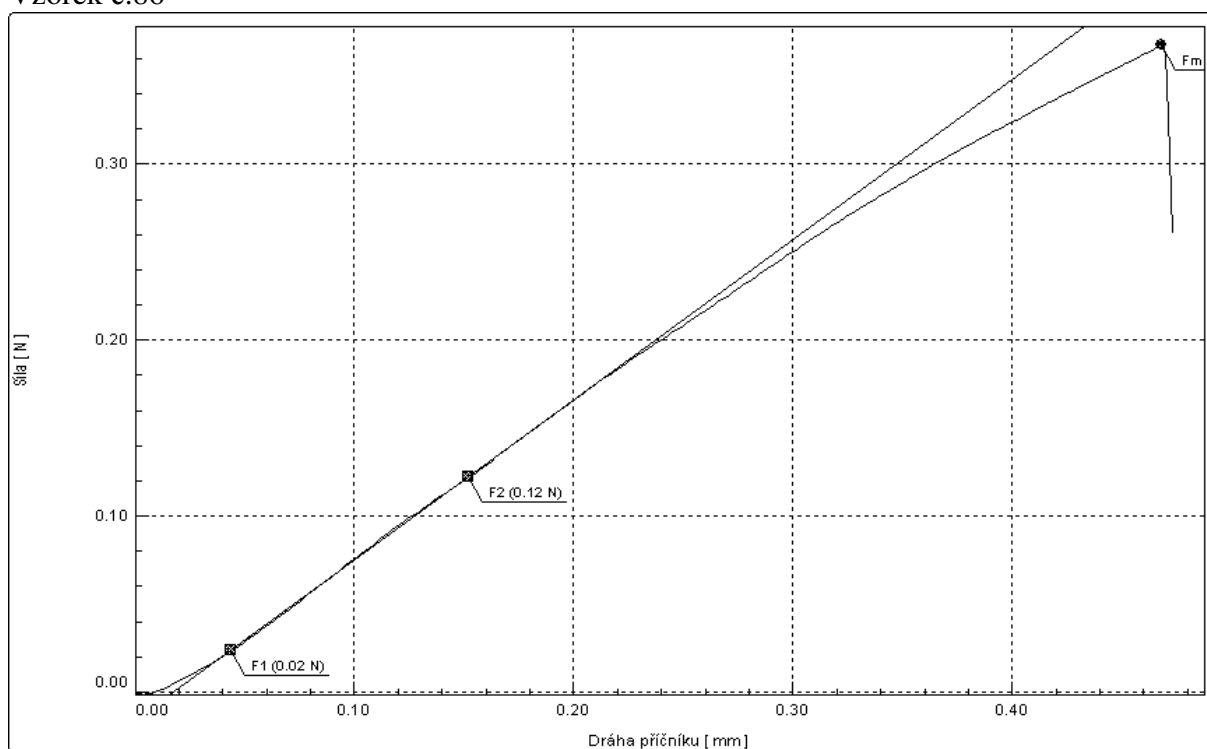
Vzorek č.84



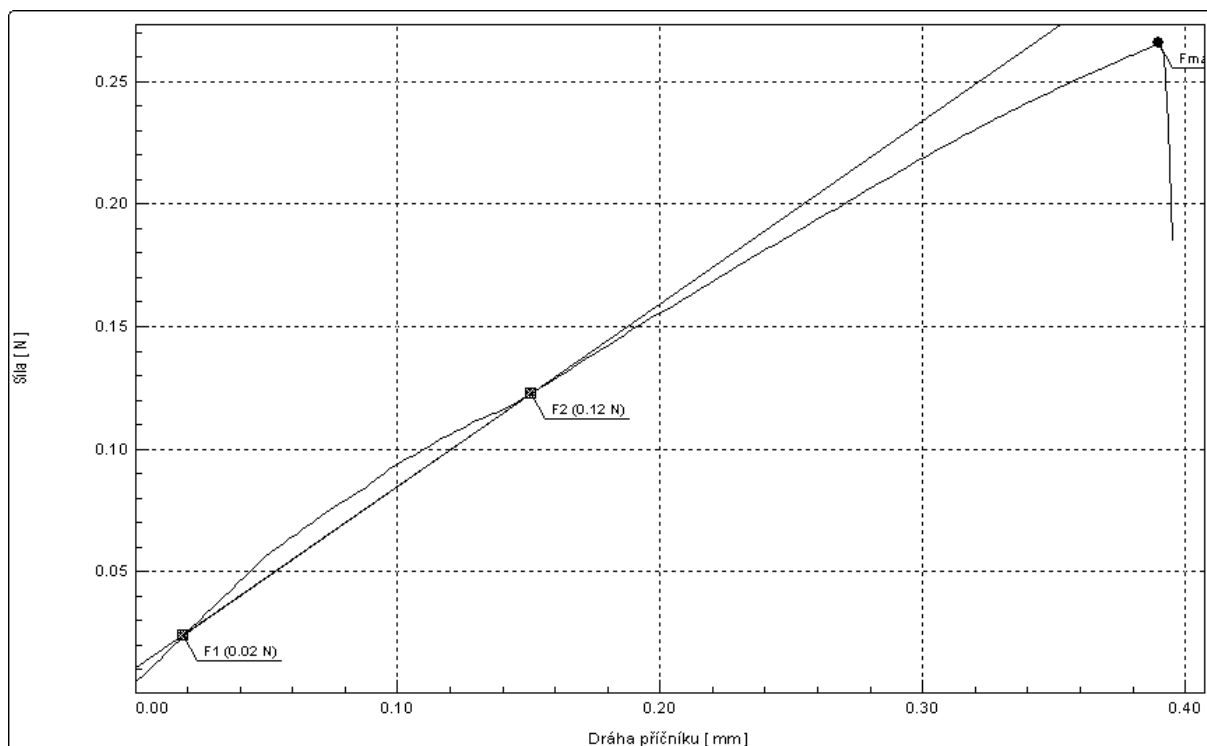
Vzorek č.85



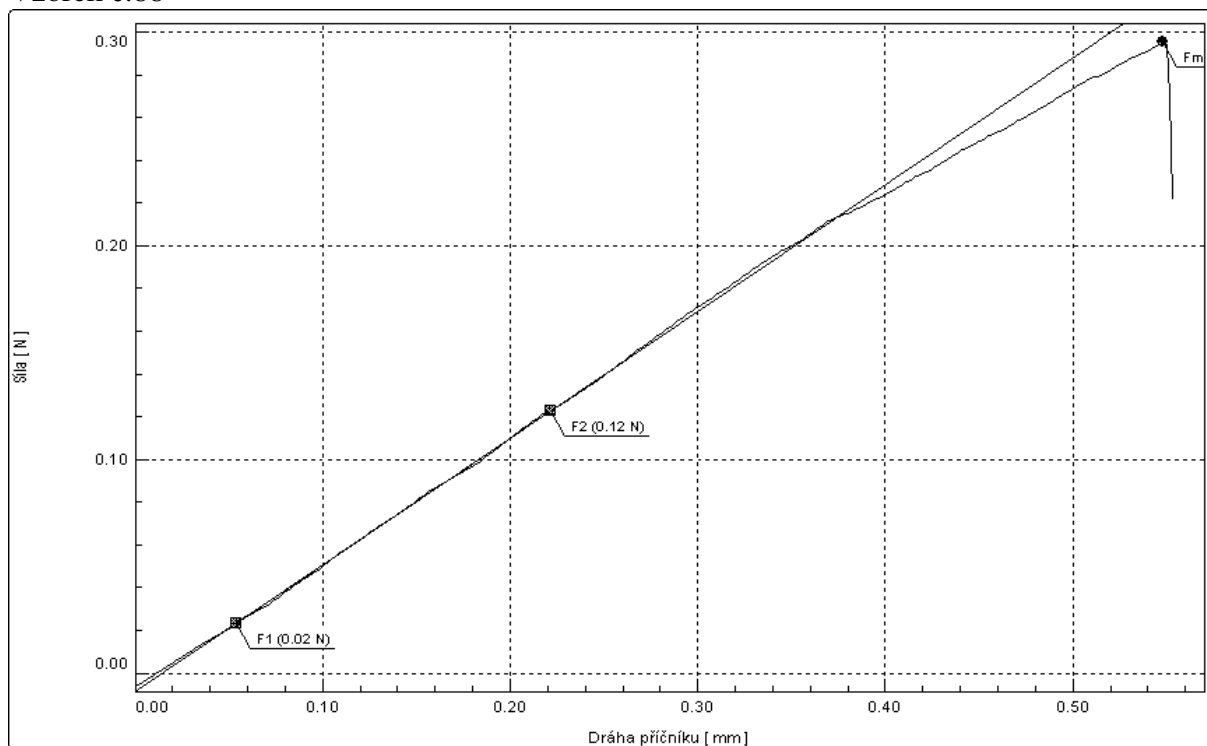
Vzorek č.86



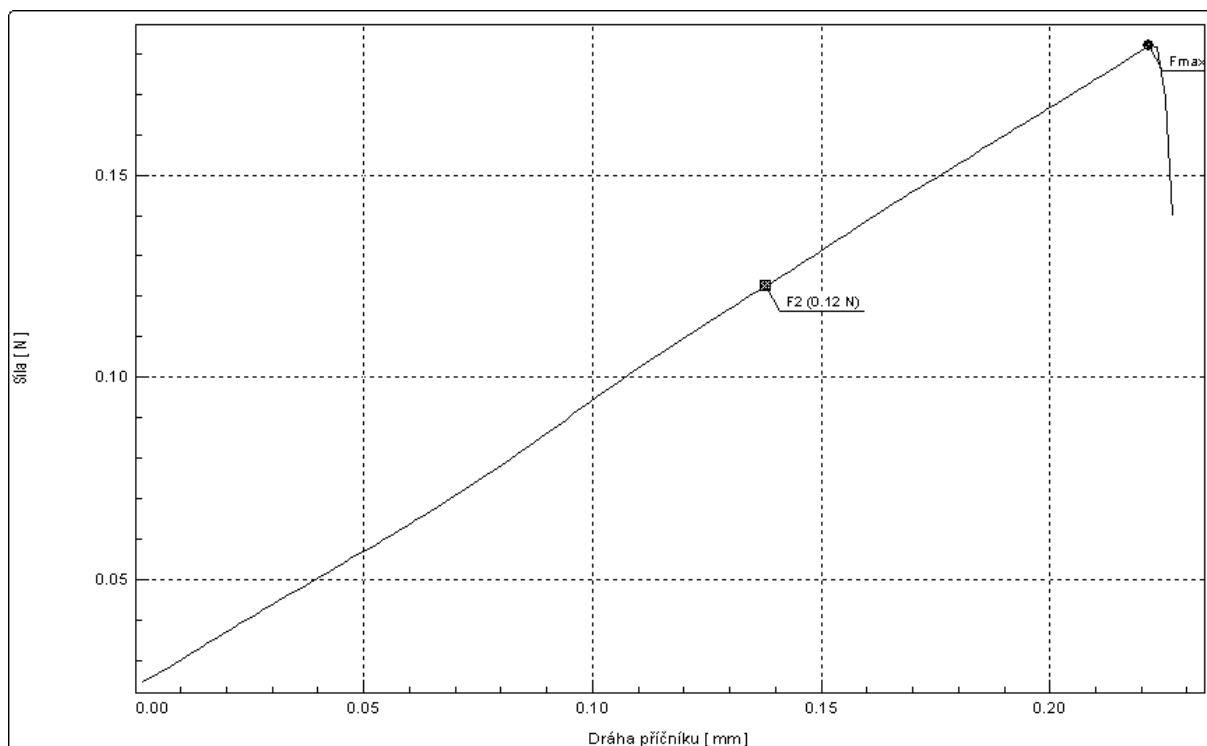
Vzorek č.87



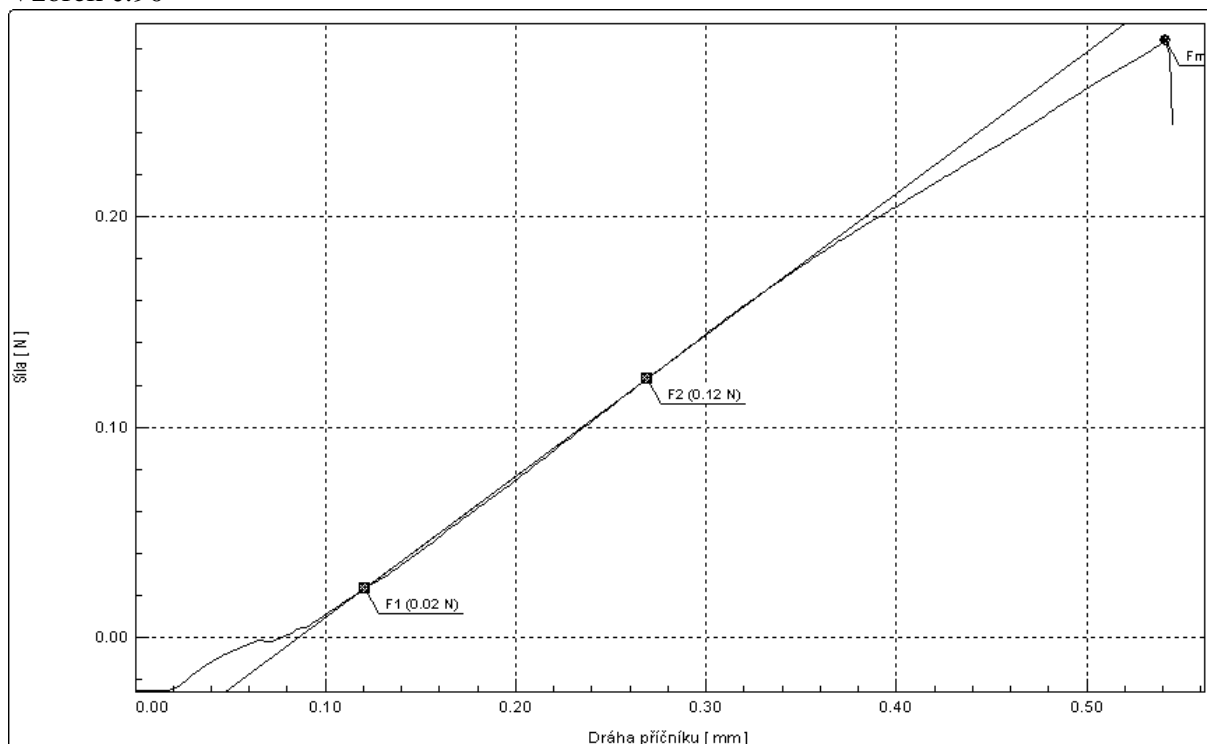
Vzorek č.88



Vzorek č.89



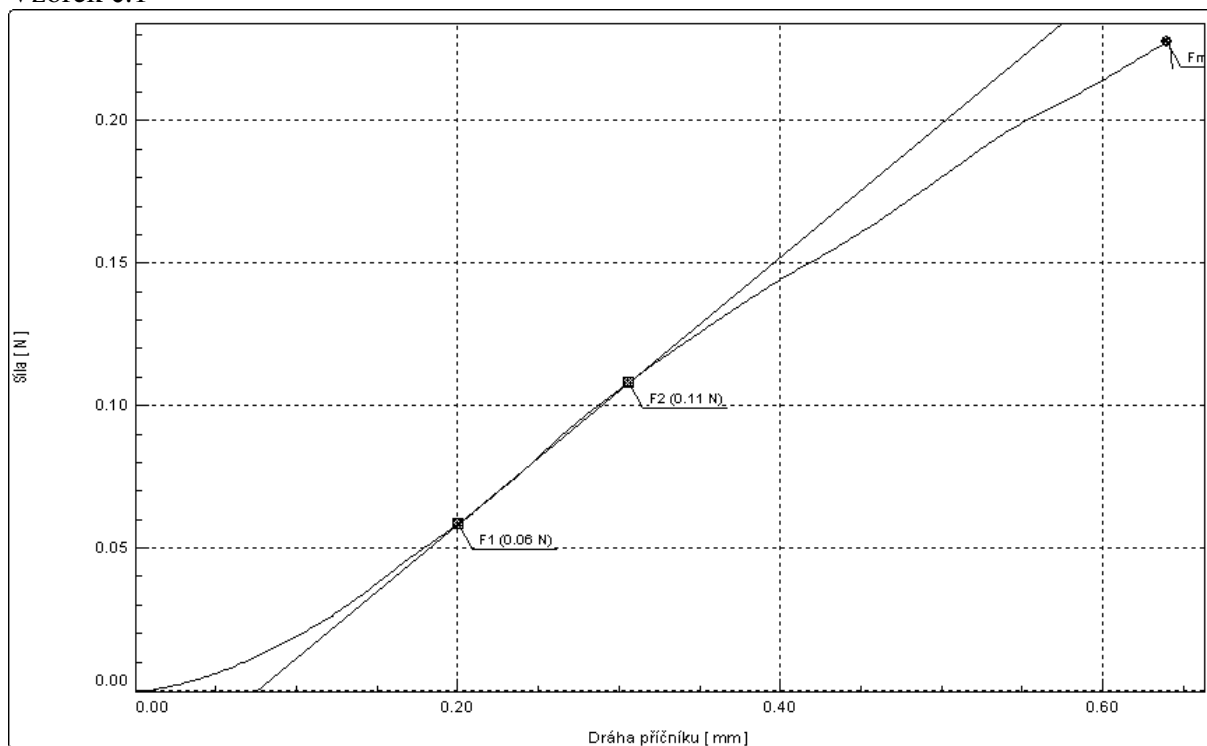
Vzorek č.90



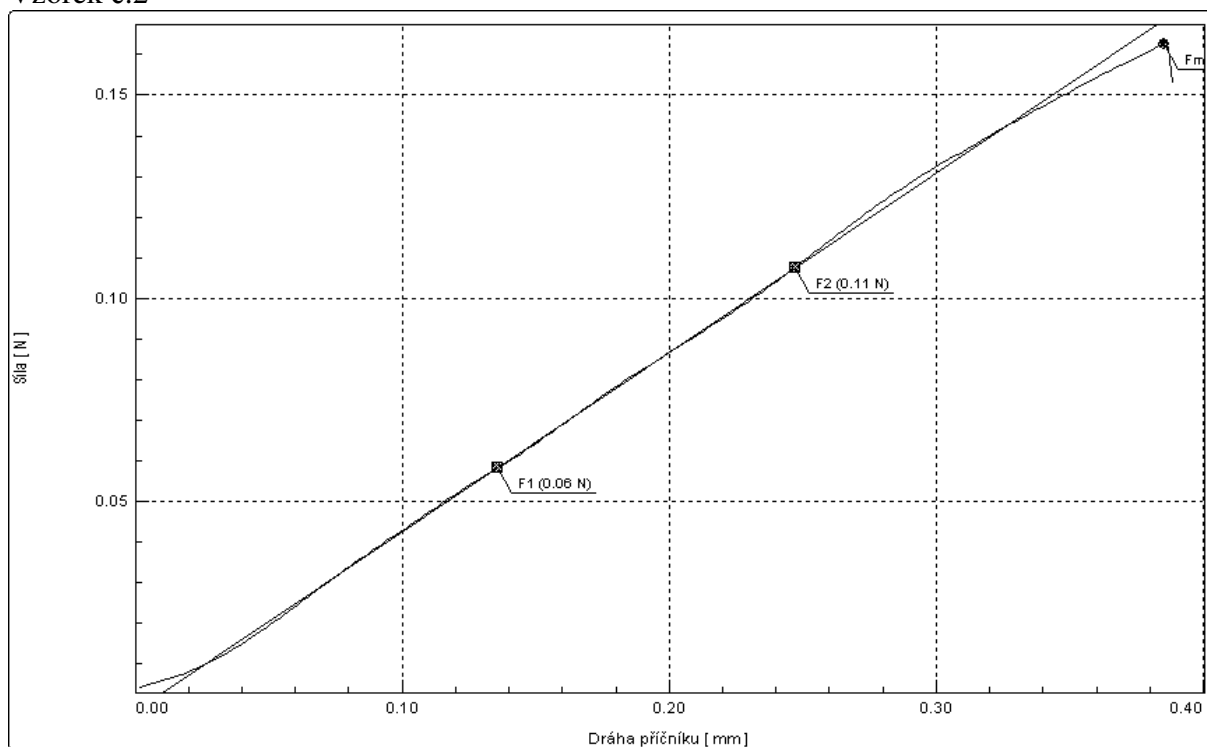
Grafické závislosti pevností z trhacího přístroje

Vlákno Kamenný věk

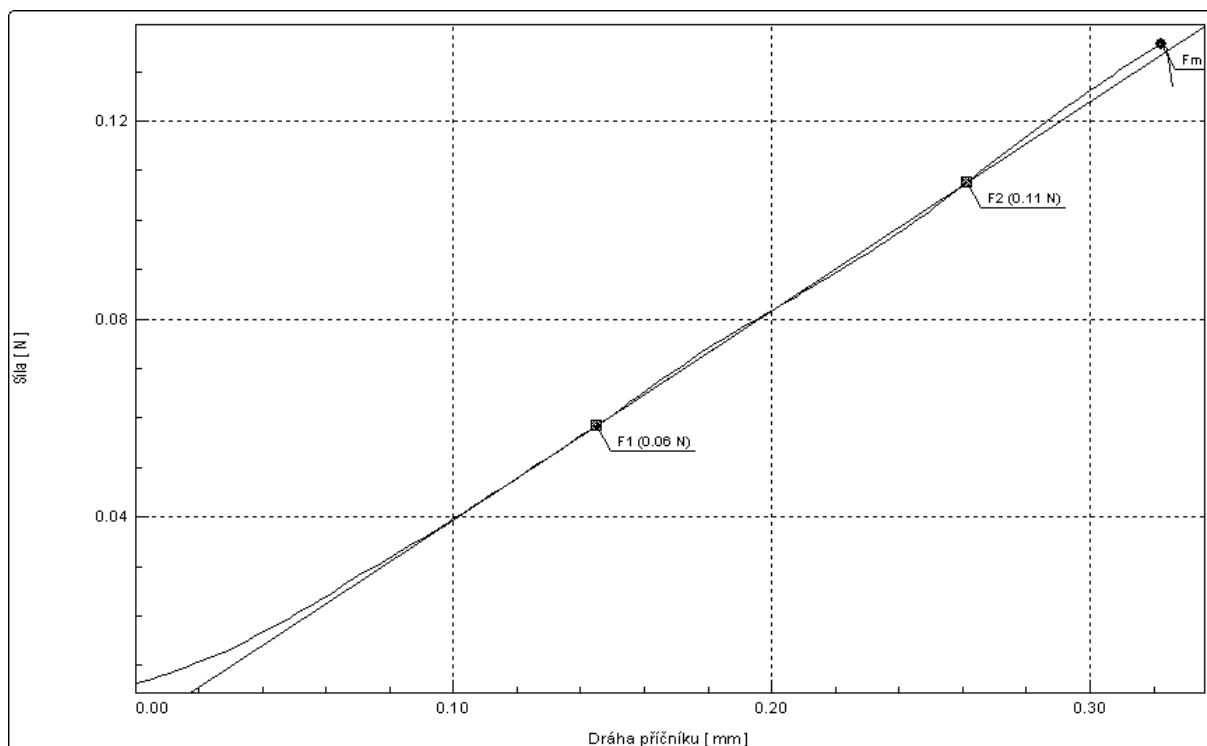
Vzorek č.1



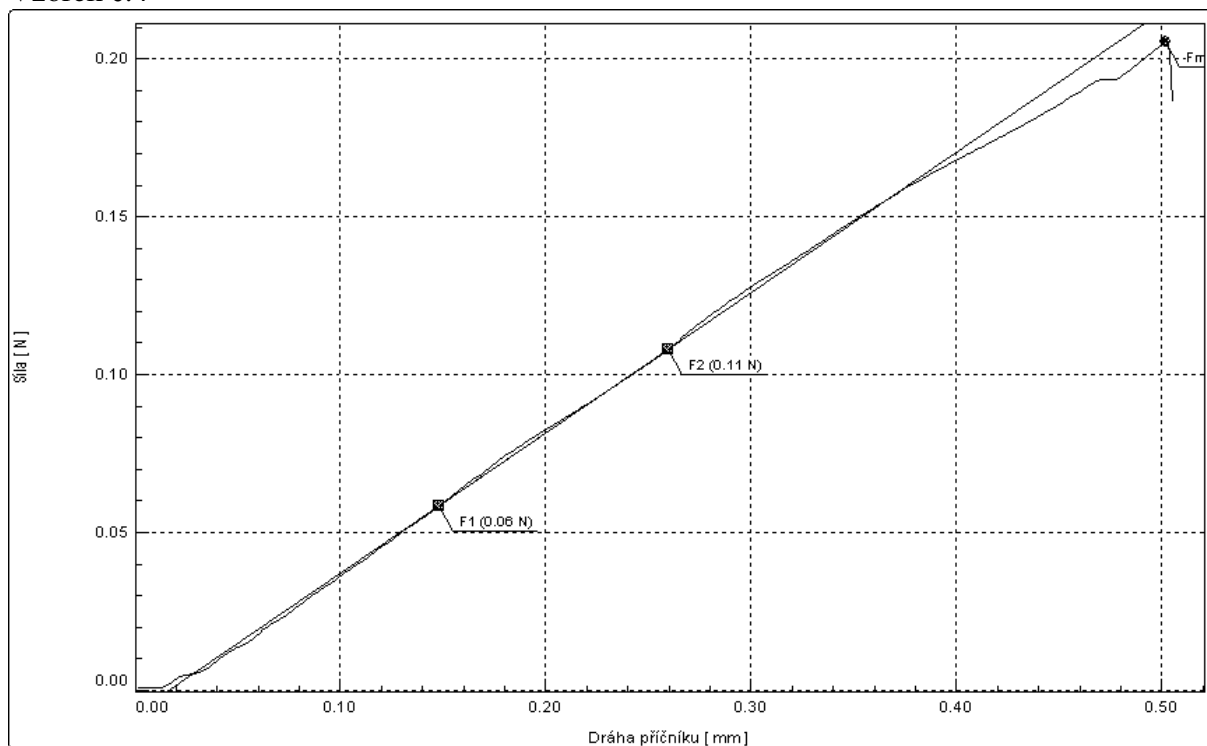
Vzorek č.2



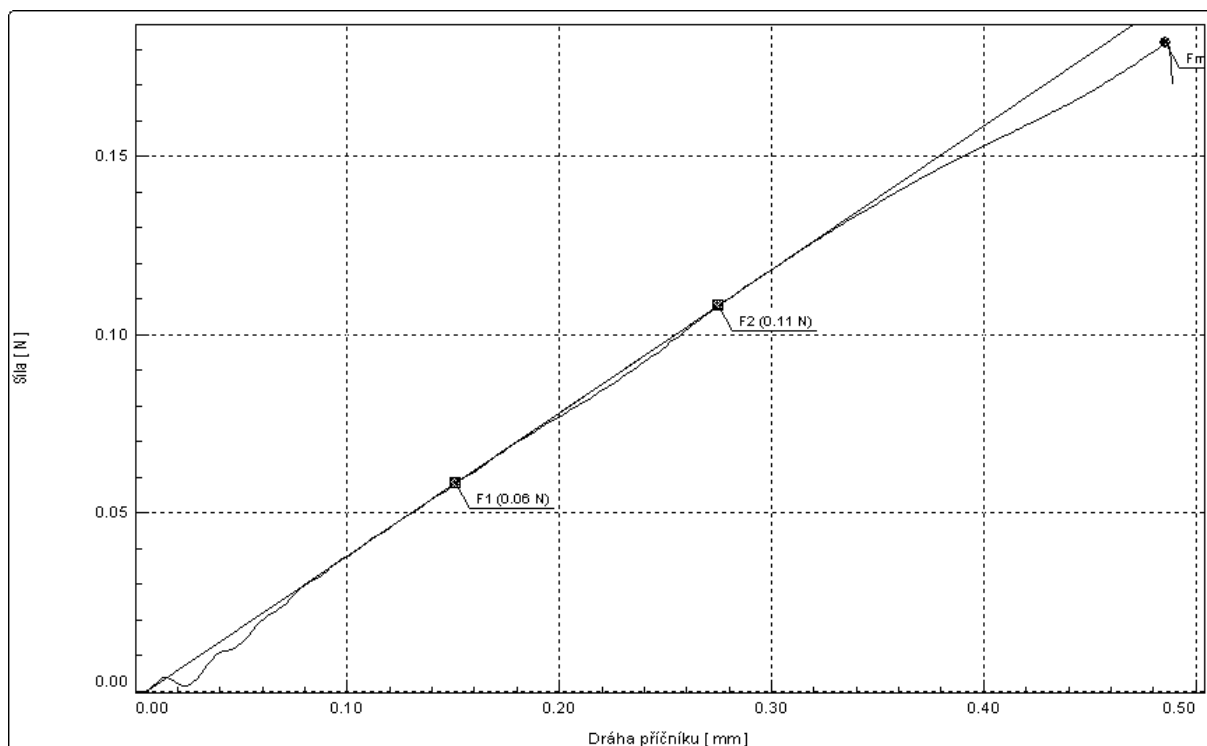
Vzorek č.3



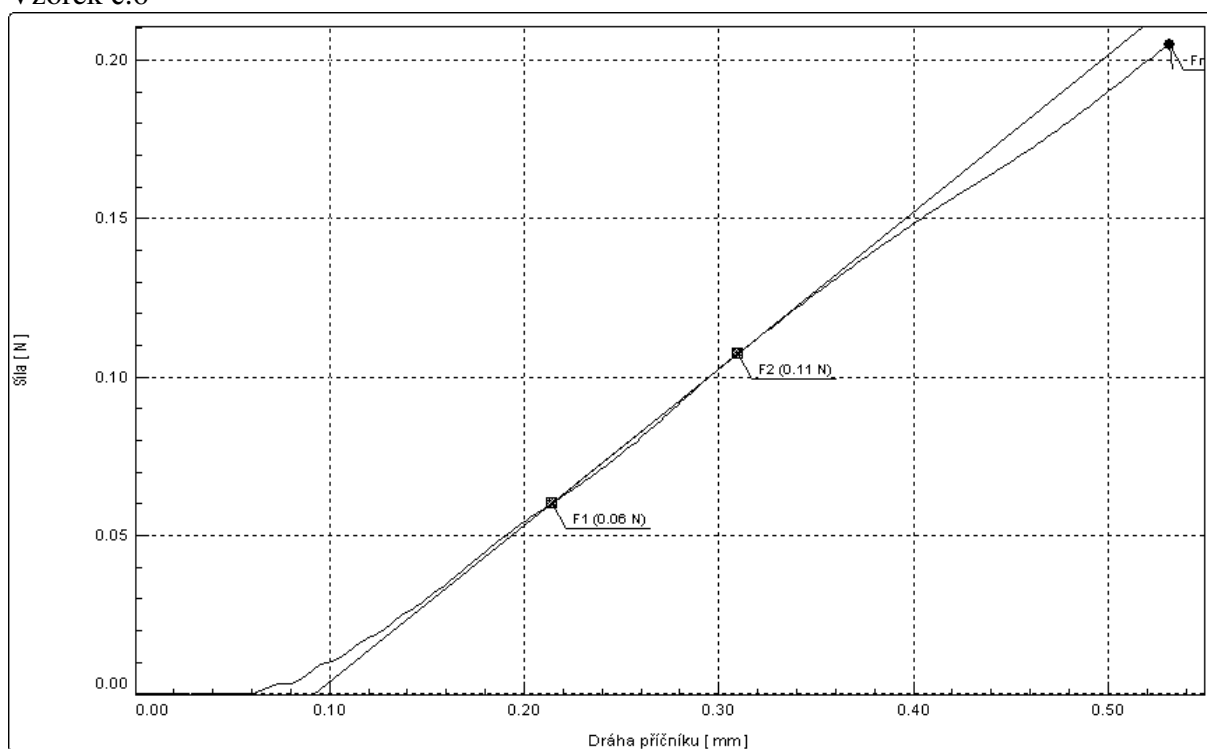
Vzorek č.4



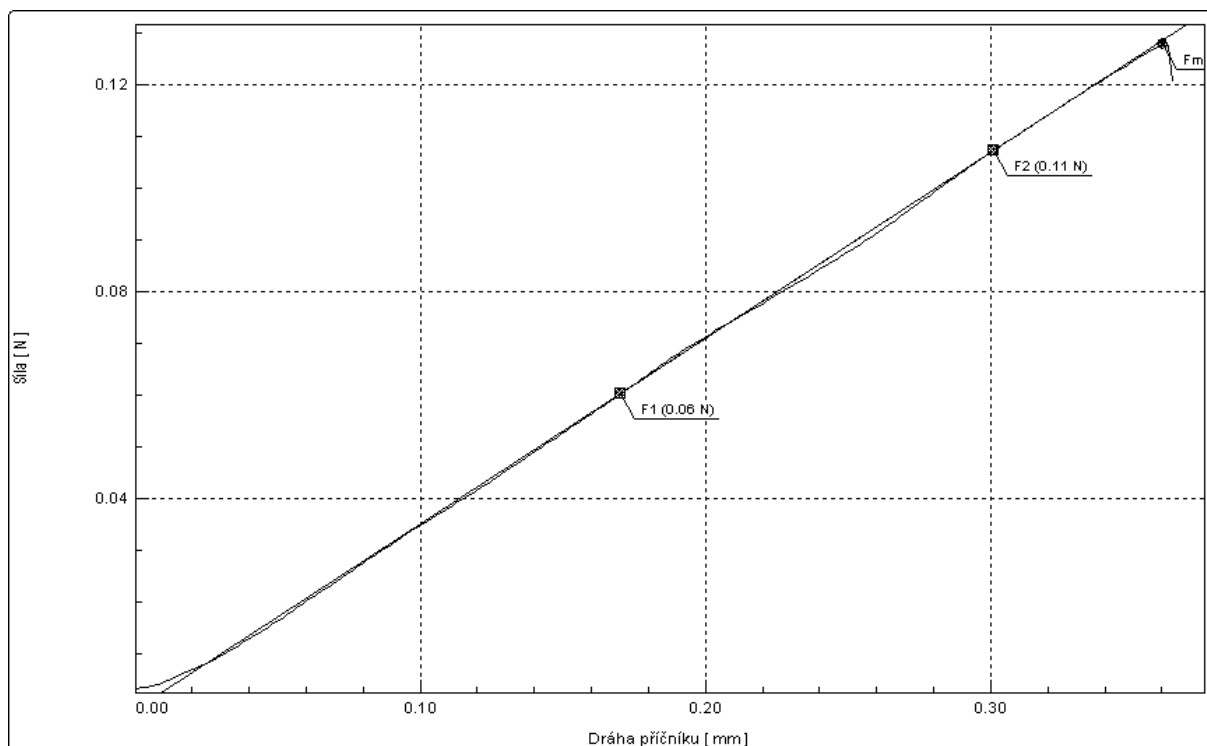
Vzorek č.5



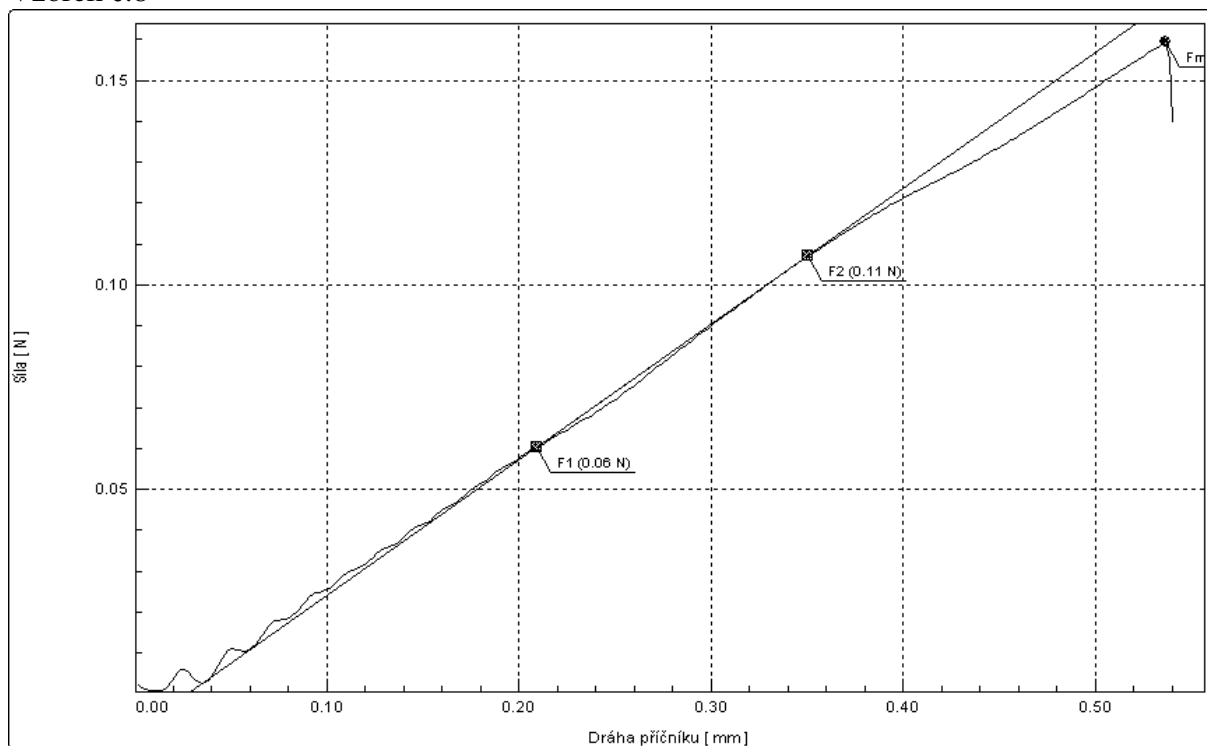
Vzorek č.6



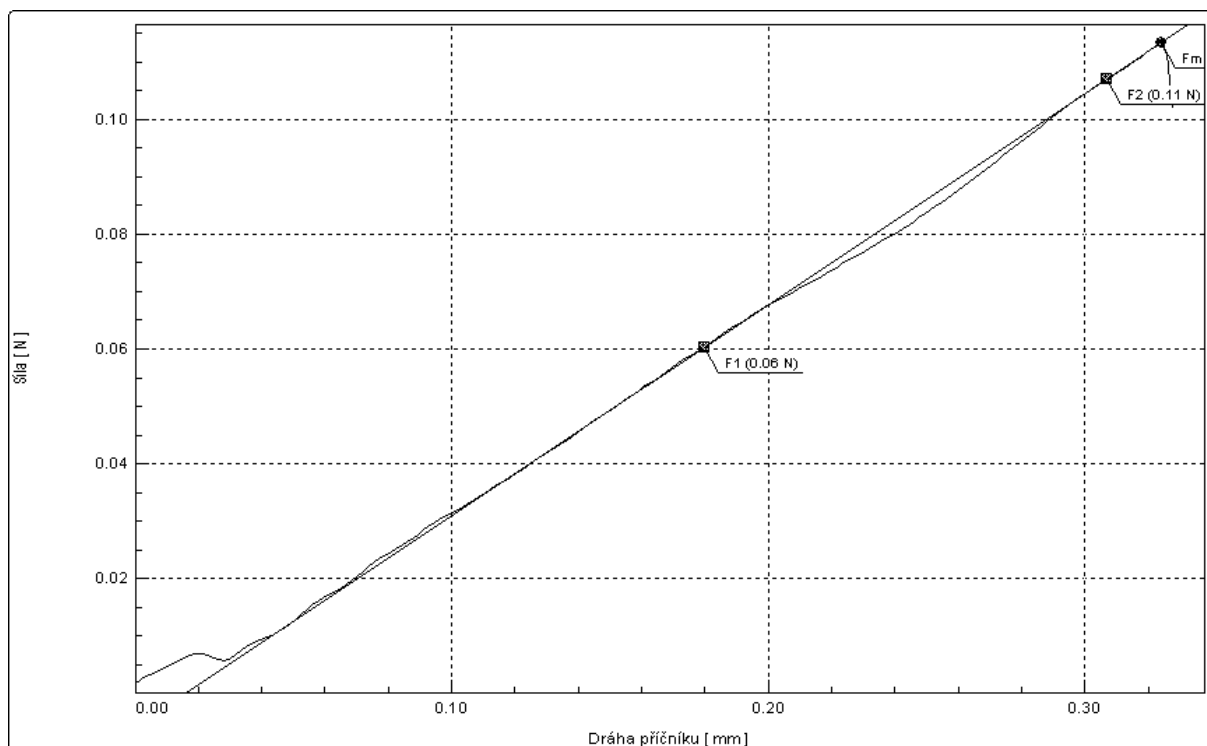
Vzorek č.7



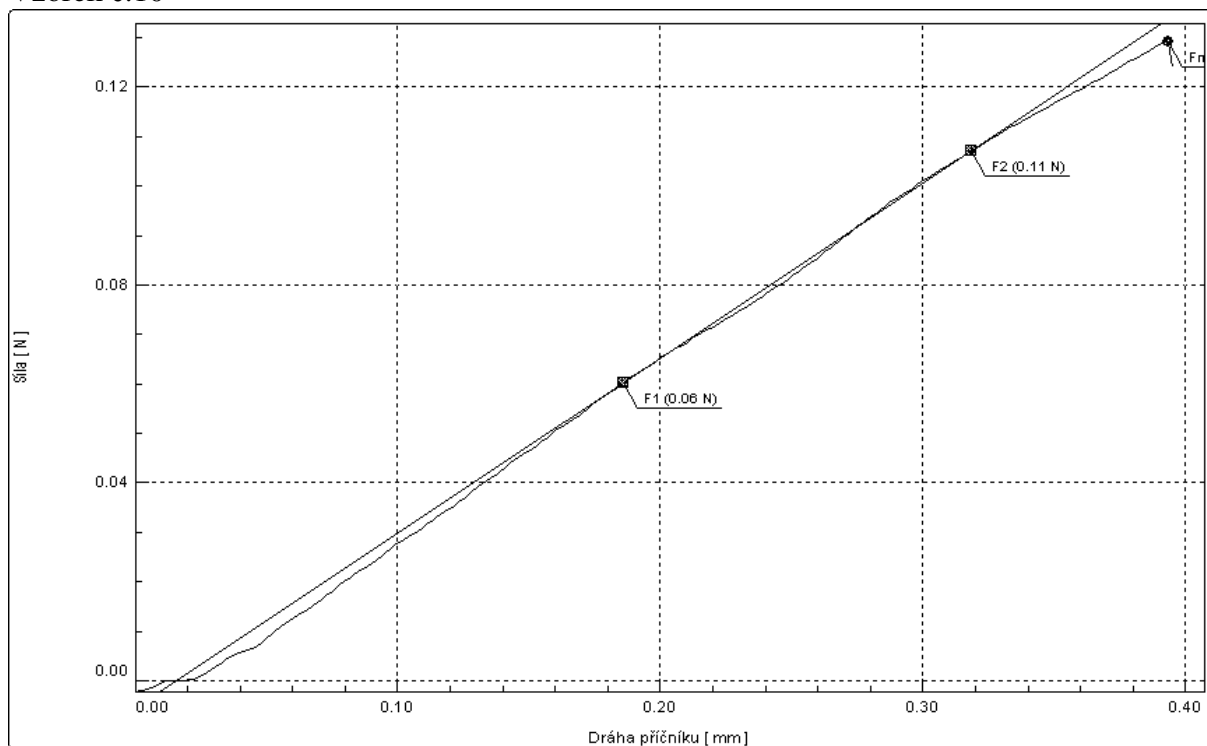
Vzorek č.8



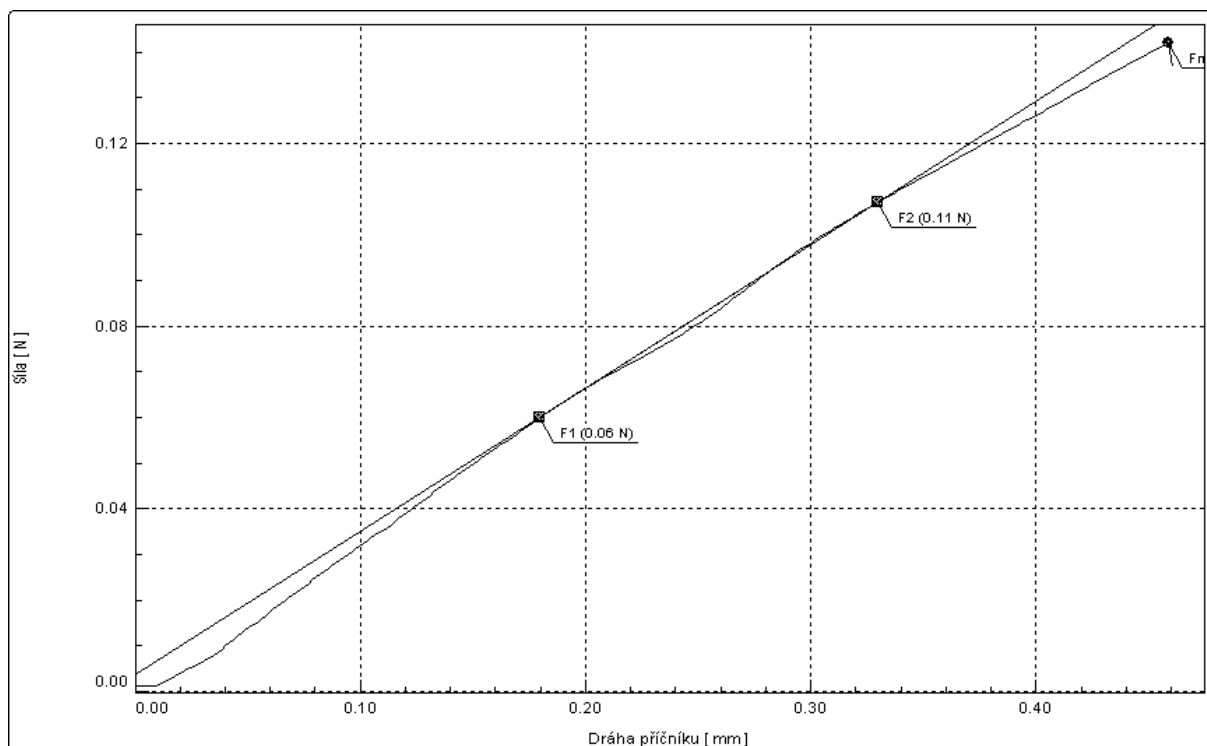
Vzorek č.9



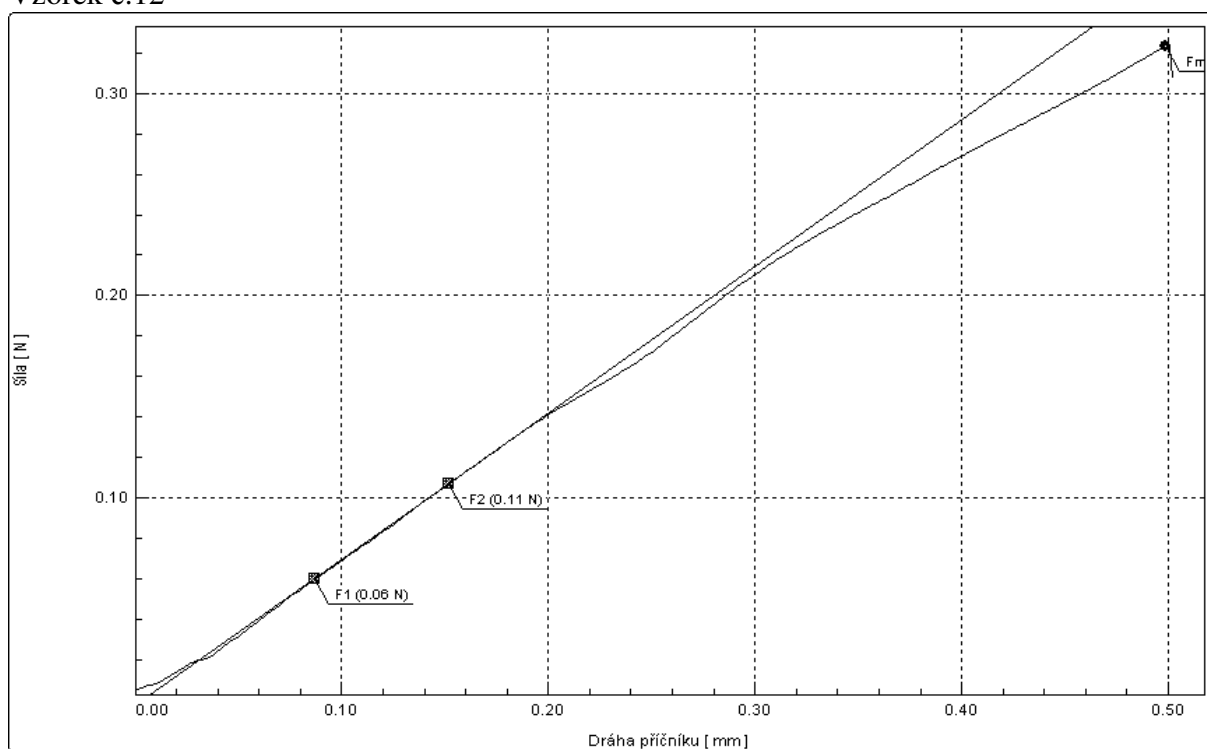
Vzorek č.10



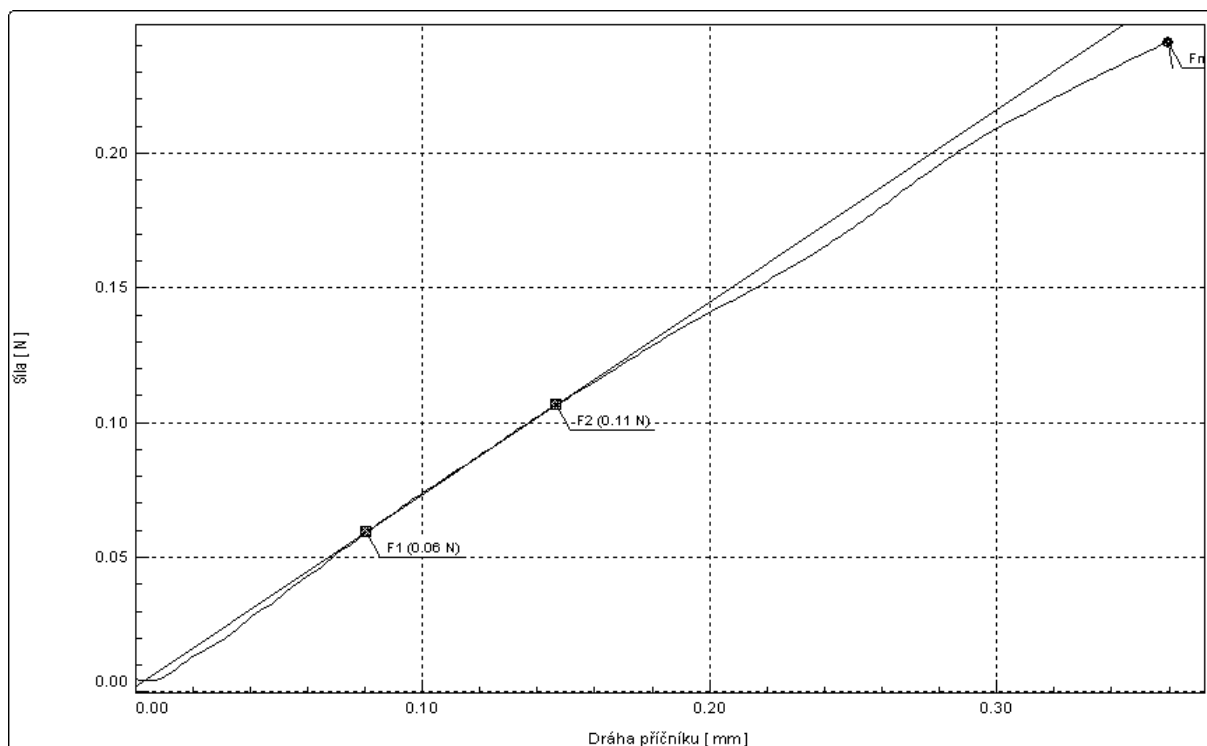
Vzorek č.11



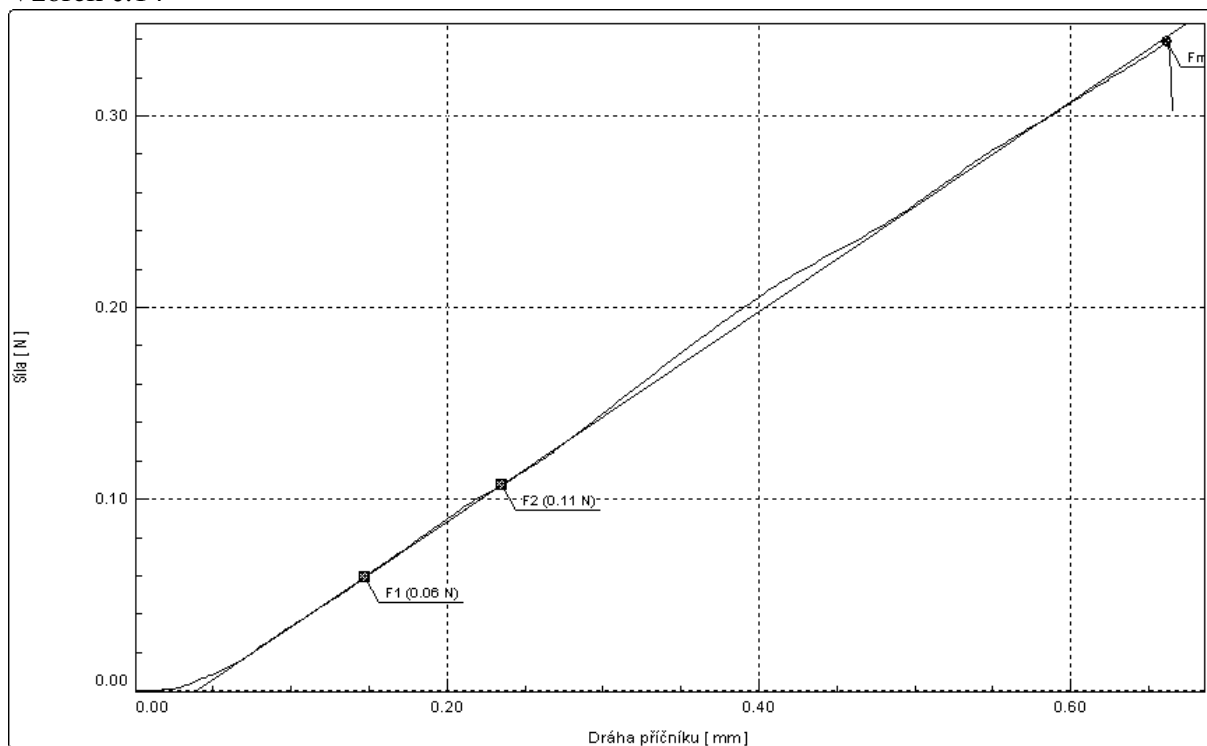
Vzorek č.12



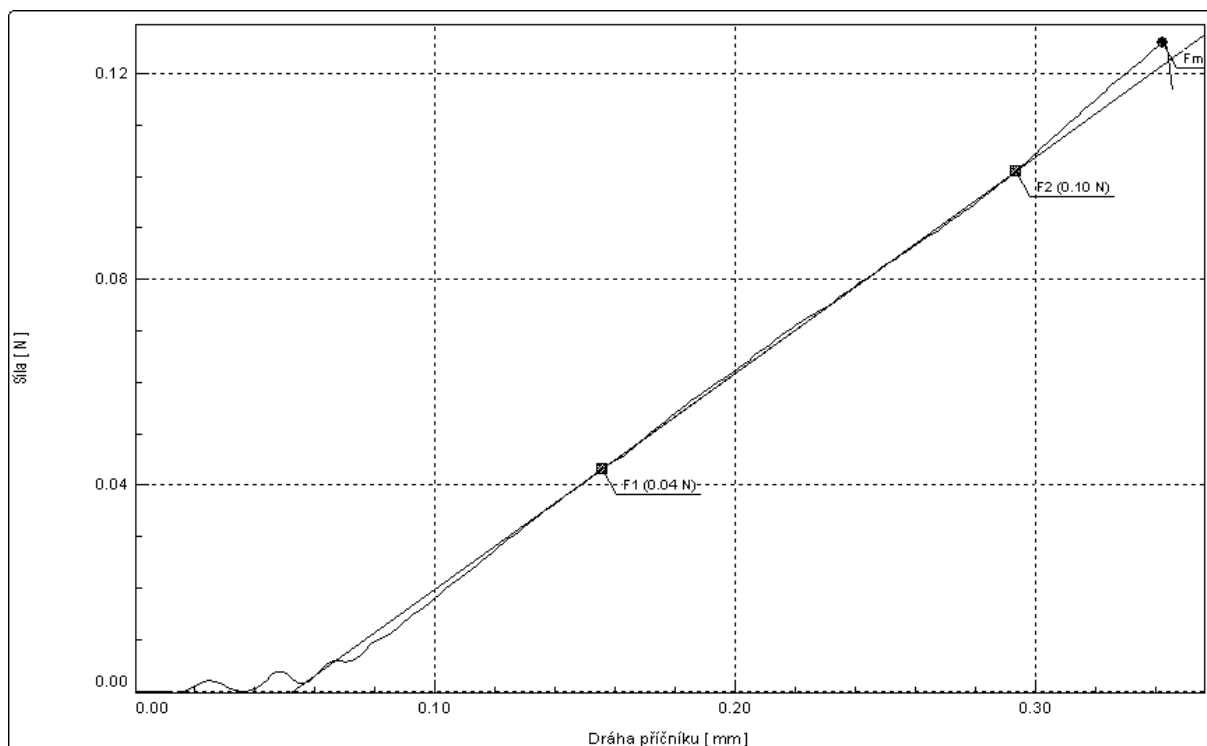
Vzorek č.13



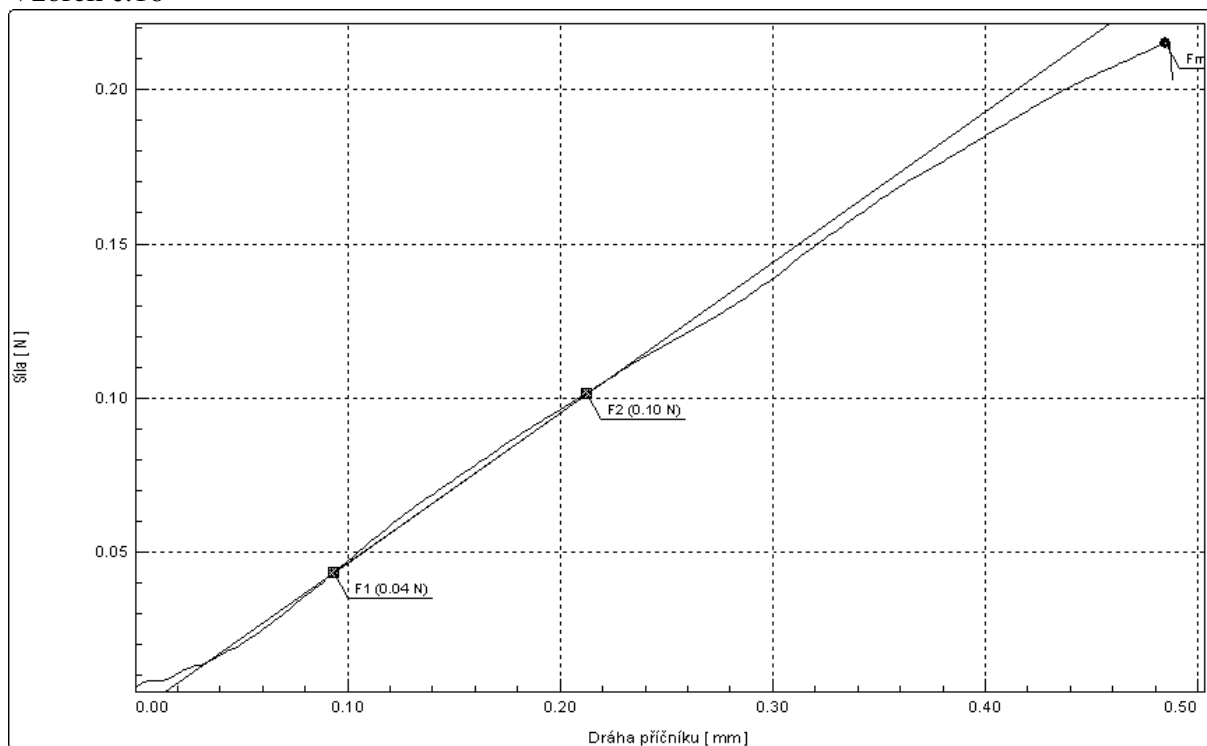
Vzorek č.14



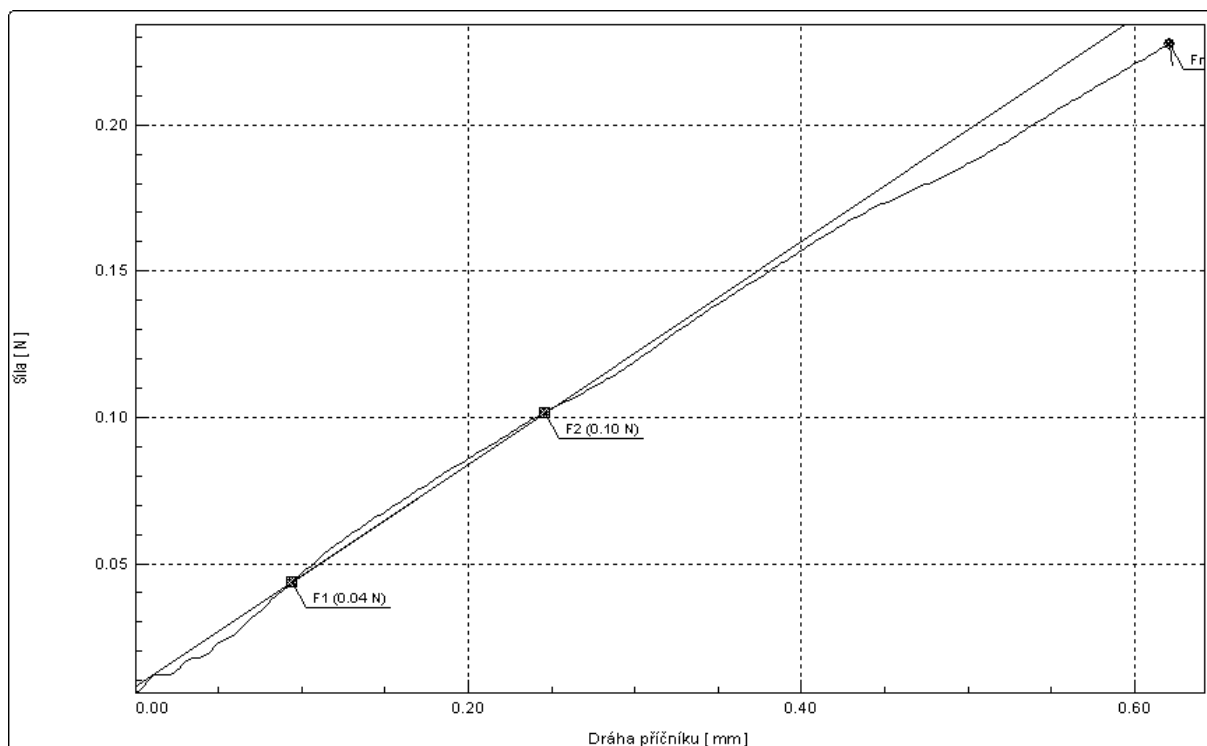
Vzorek č.15



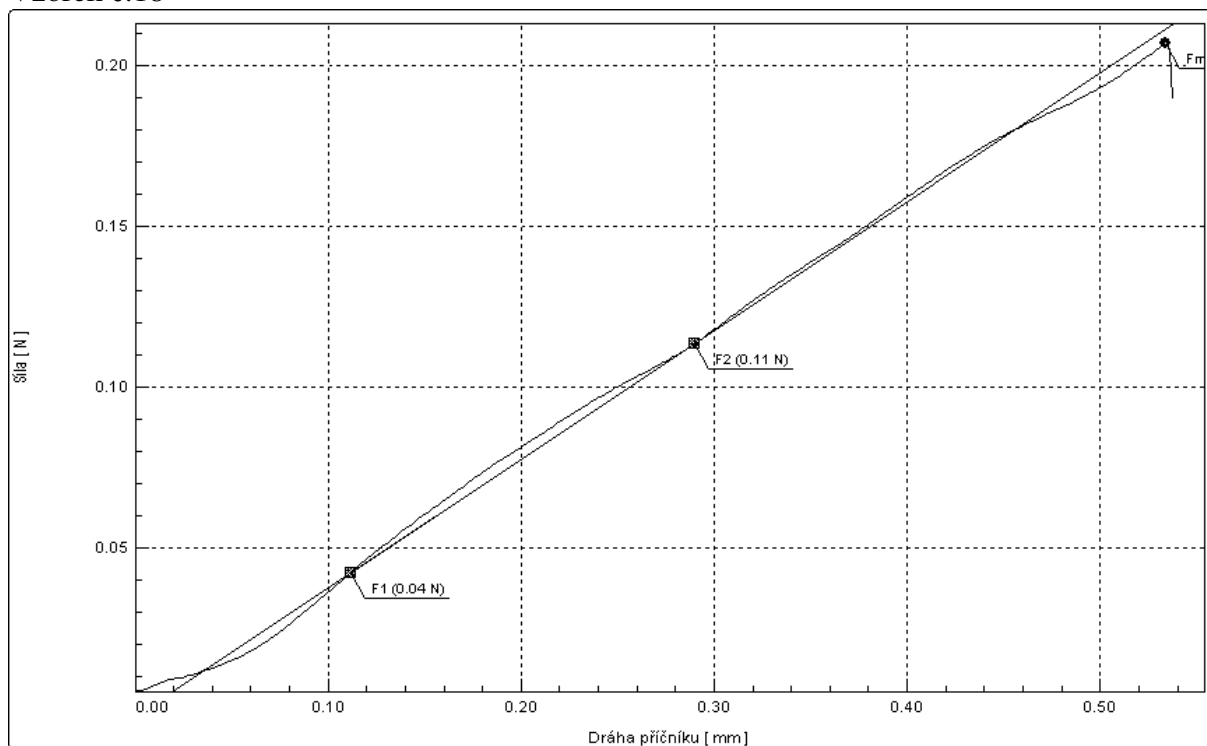
Vzorek č.16



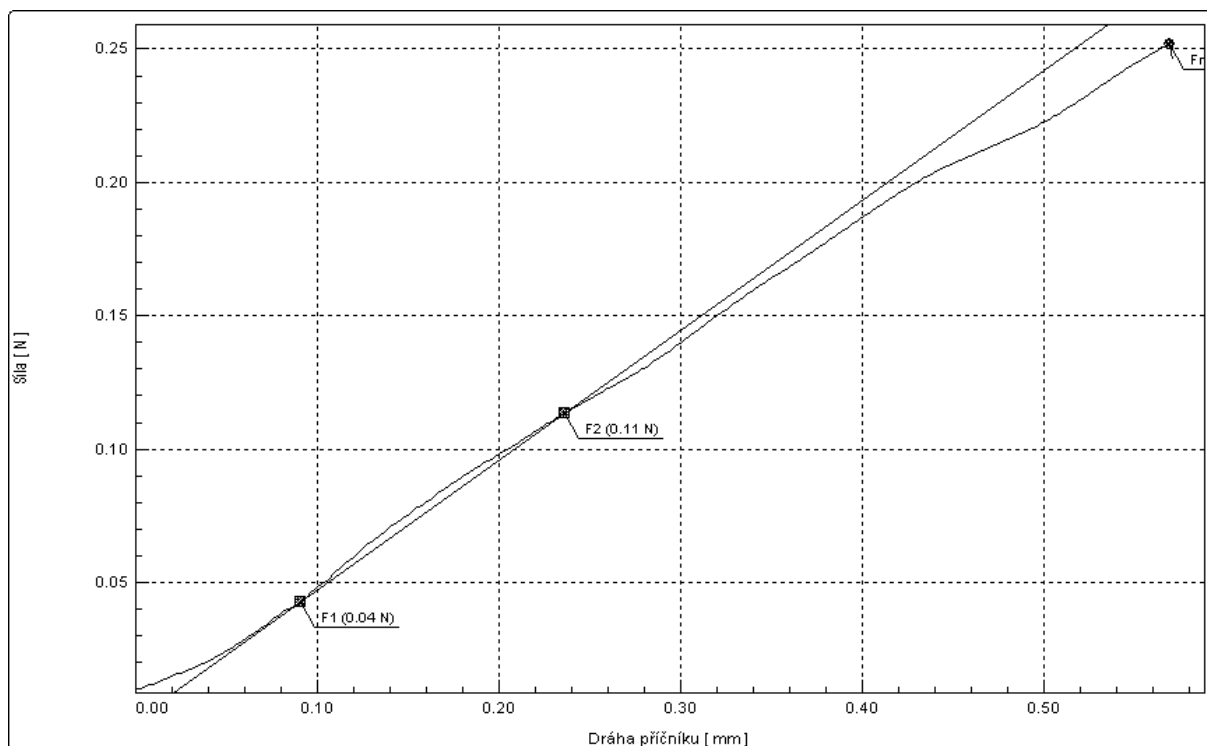
Vzorek č.17



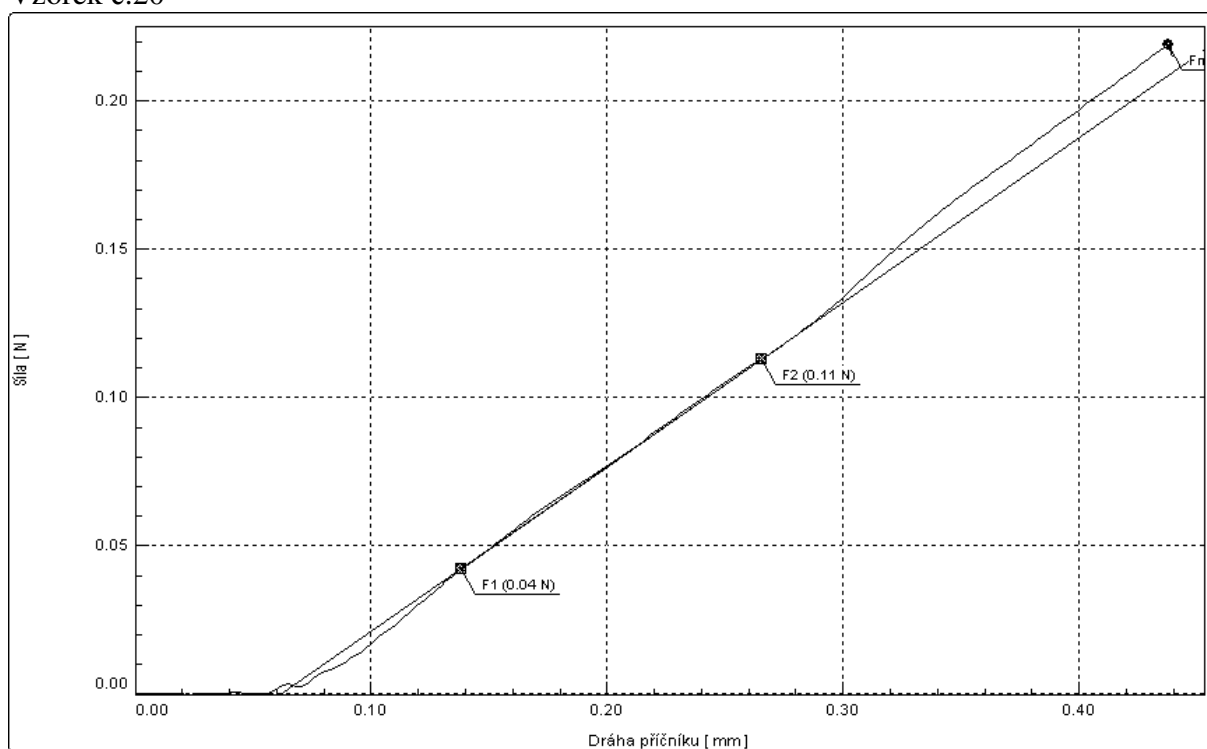
Vzorek č.18



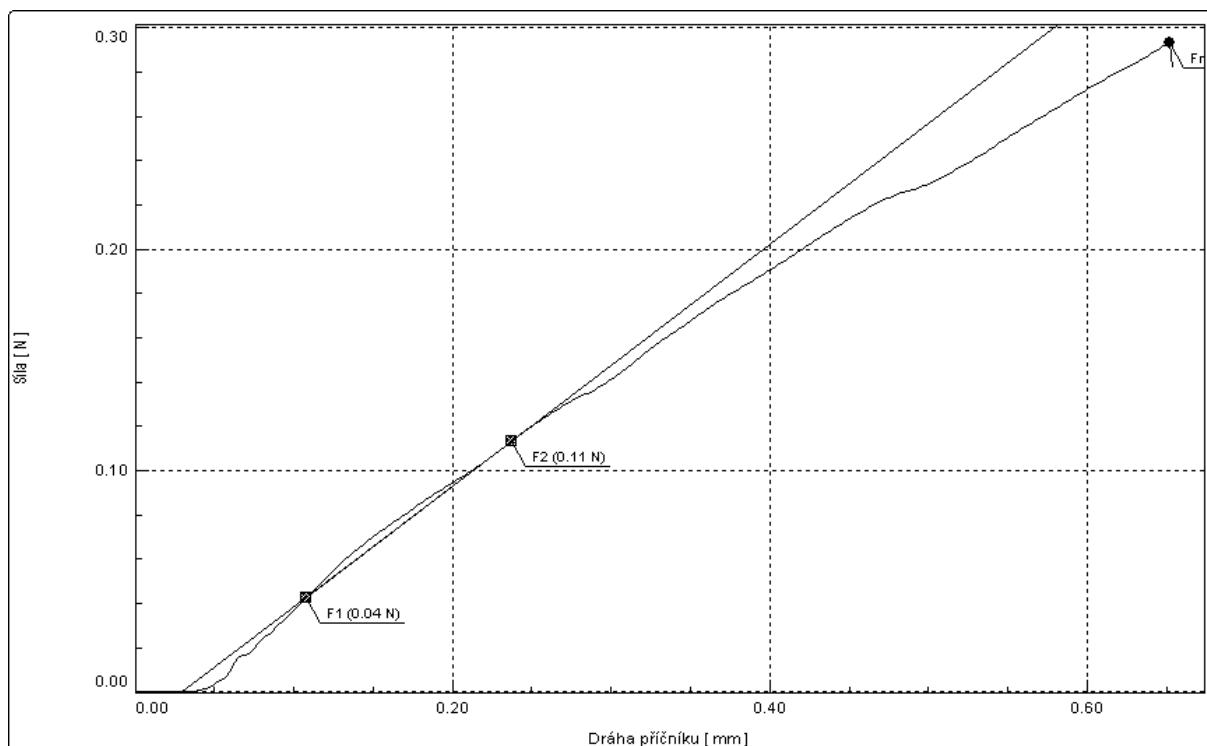
Vzorek č.19



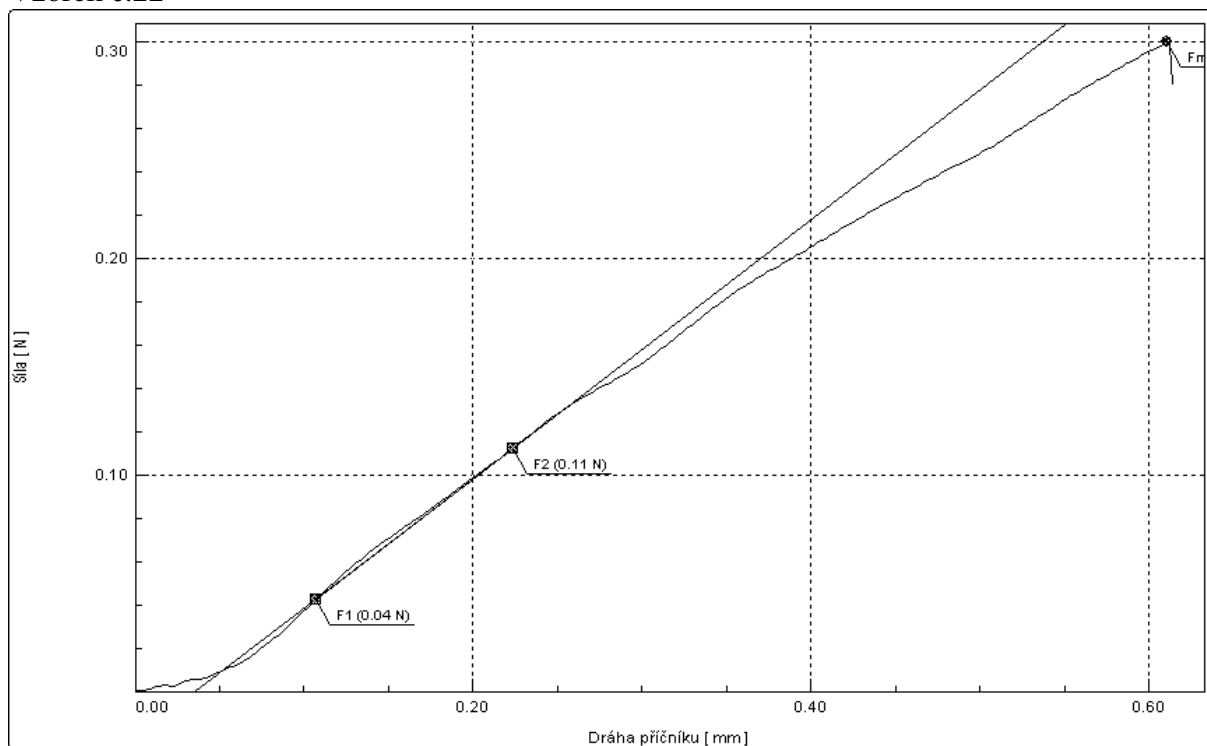
Vzorek č.20



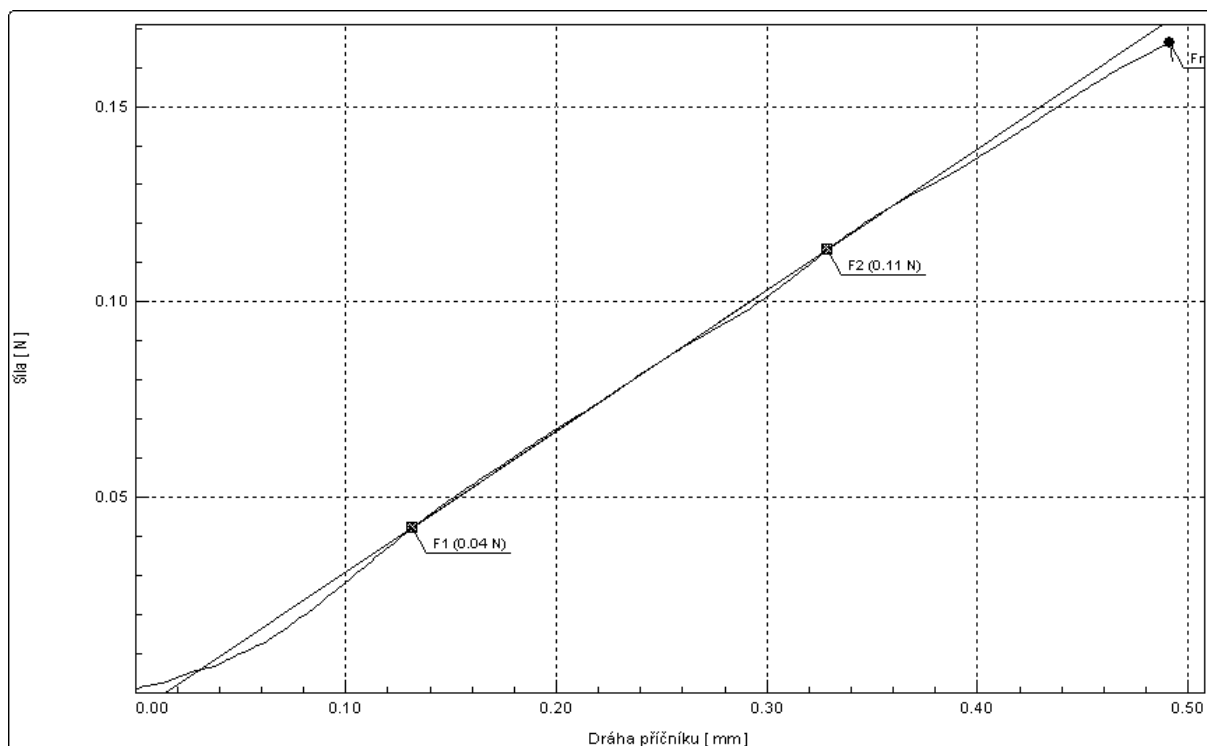
Vzorek č.21



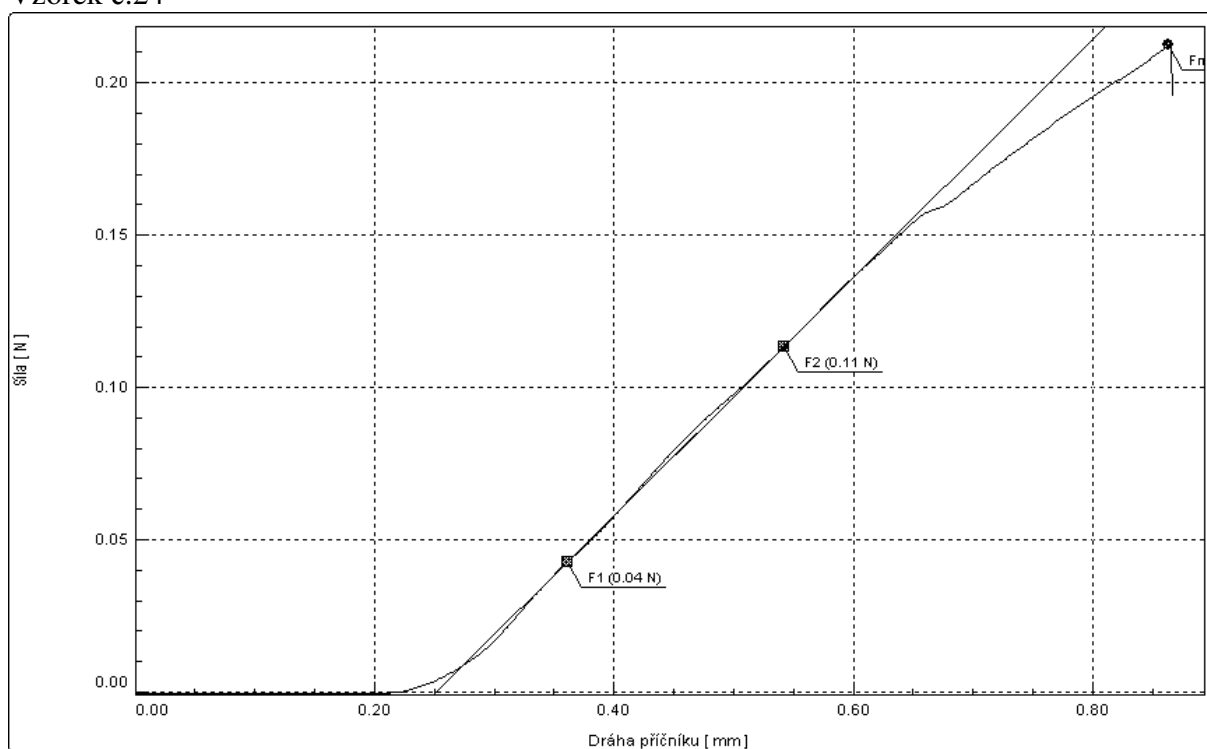
Vzorek č.22



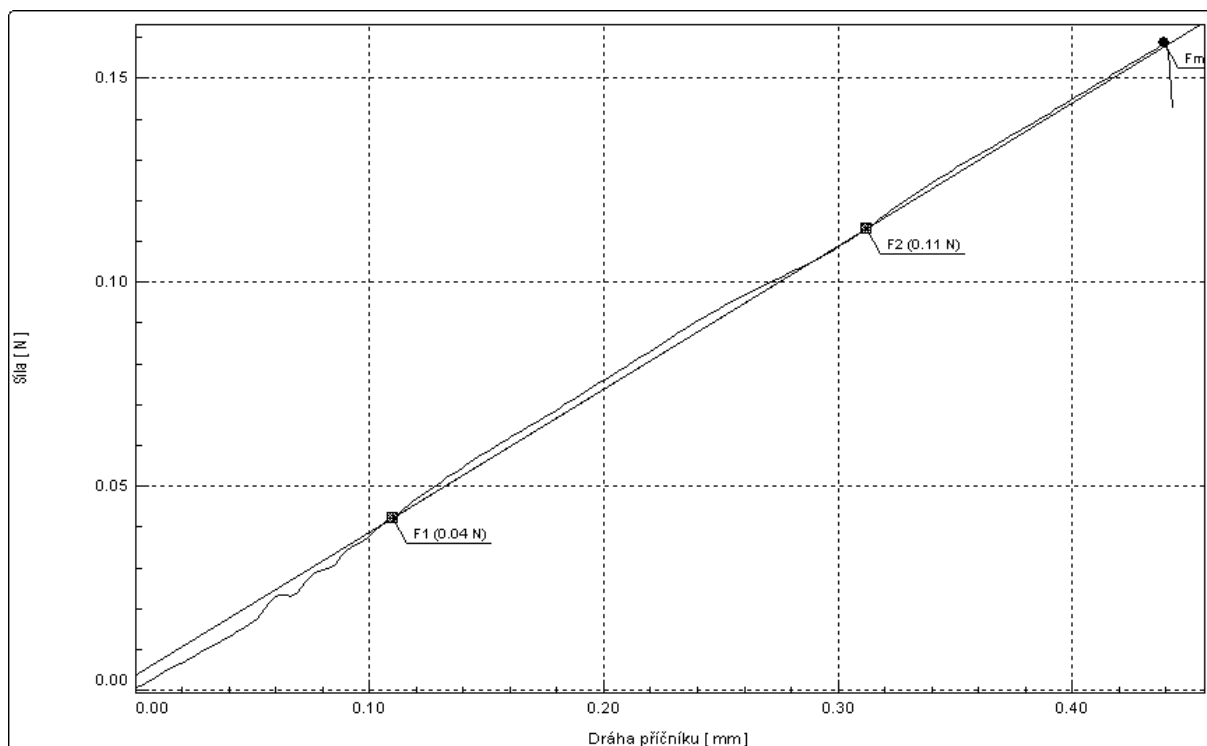
Vzorek č.23



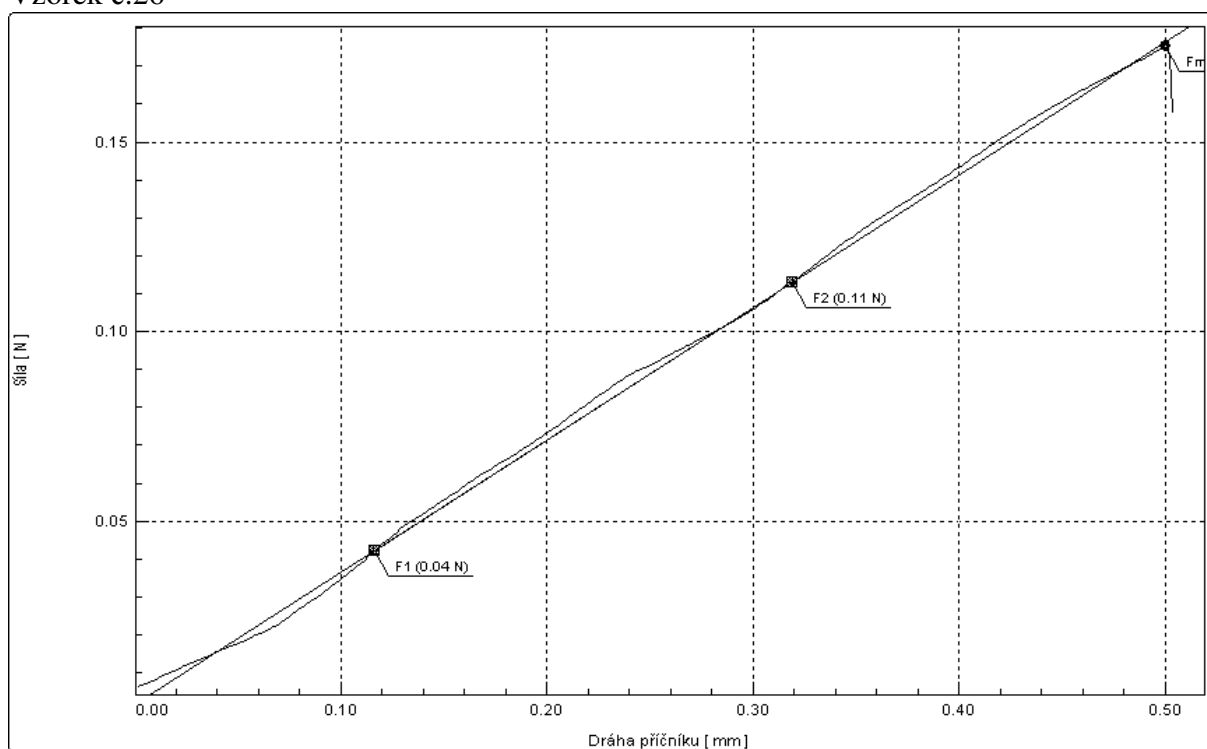
Vzorek č.24



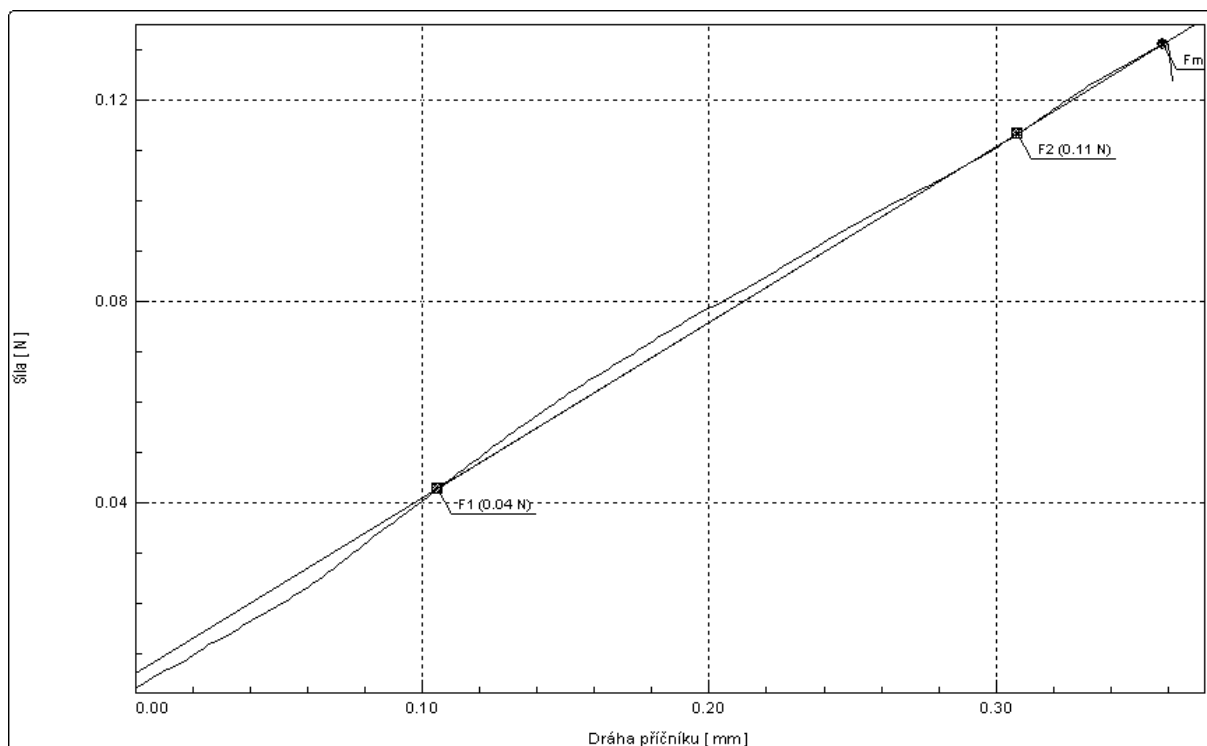
Vzorek č.25



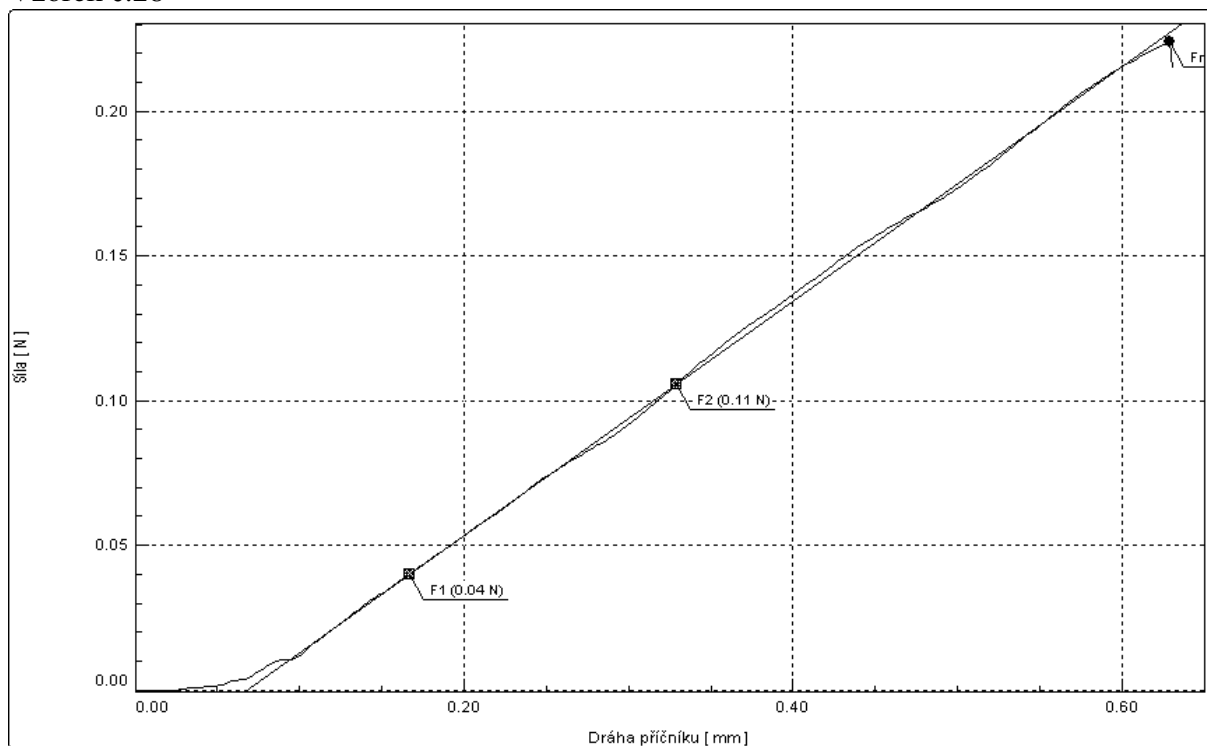
Vzorek č.26



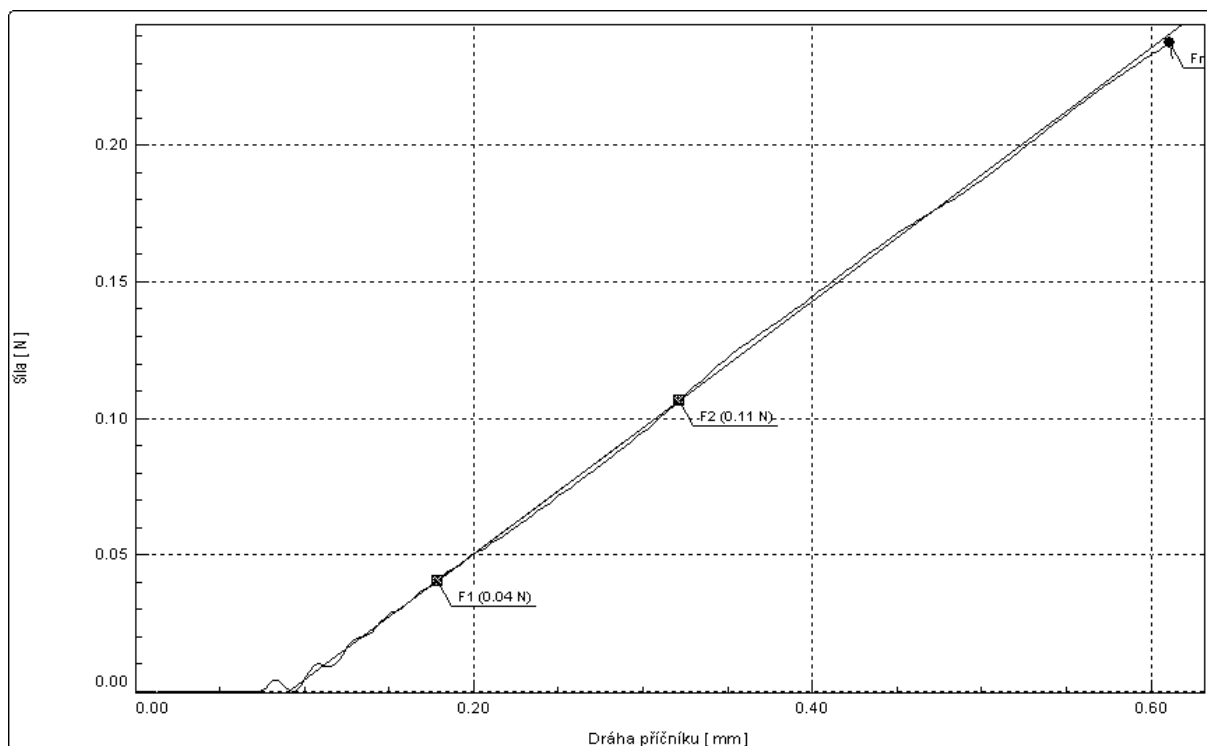
Vzorek č.27



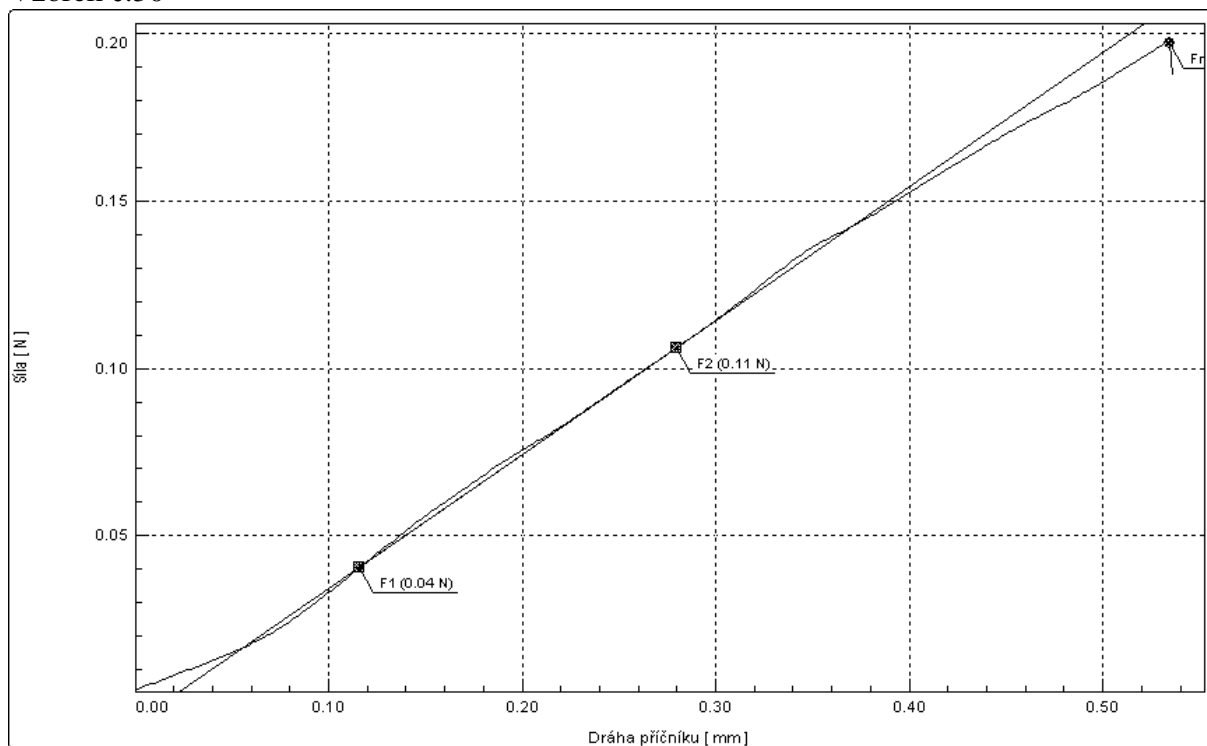
Vzorek č.28



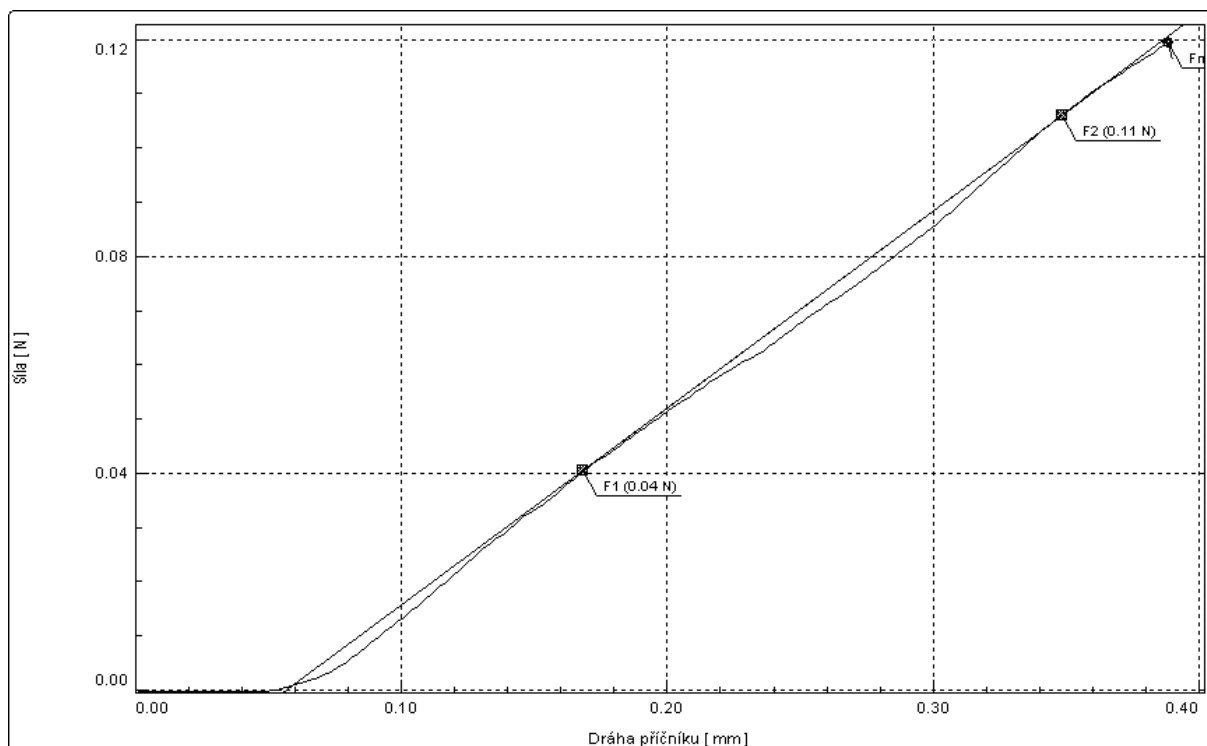
Vzorek č.29



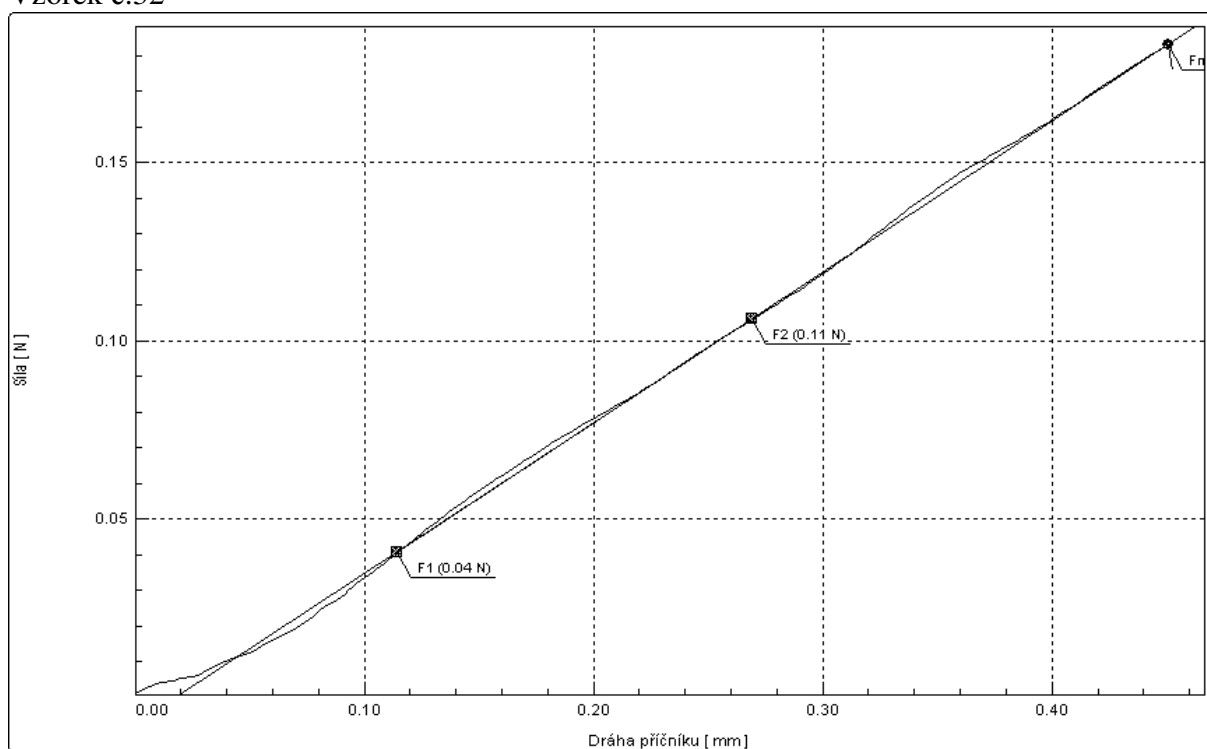
Vzorek č.30



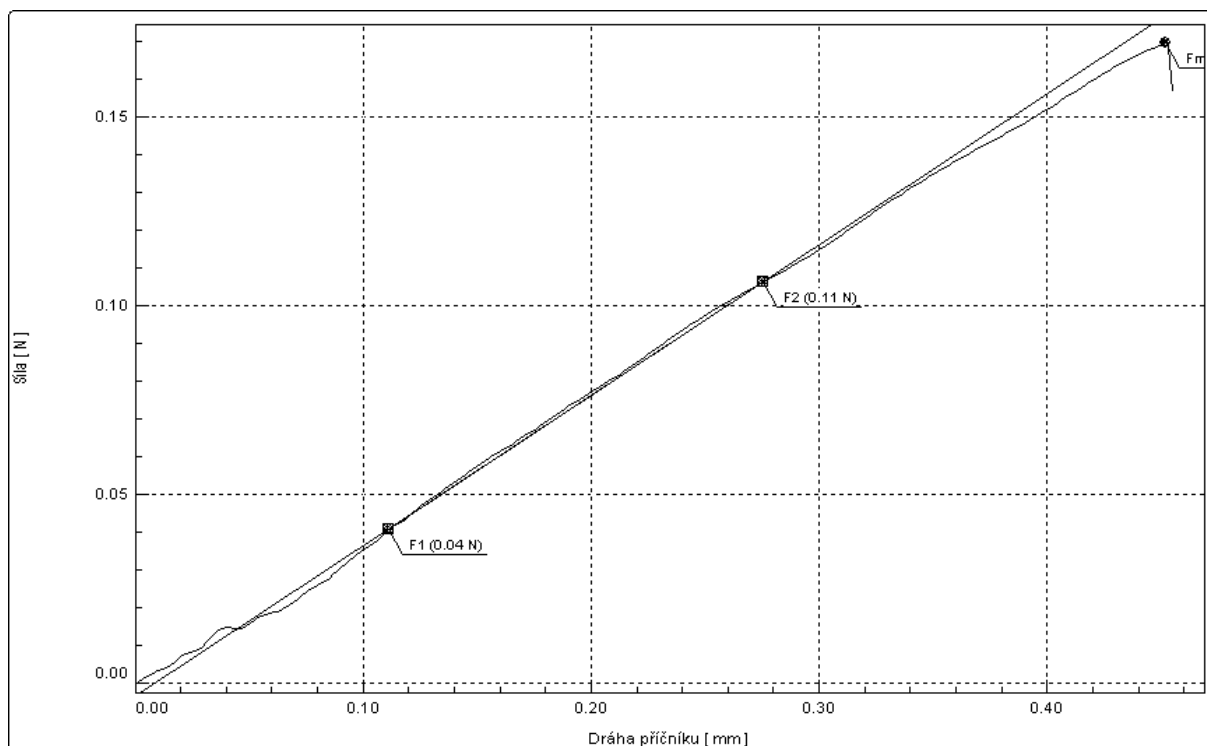
Vzorek č.31



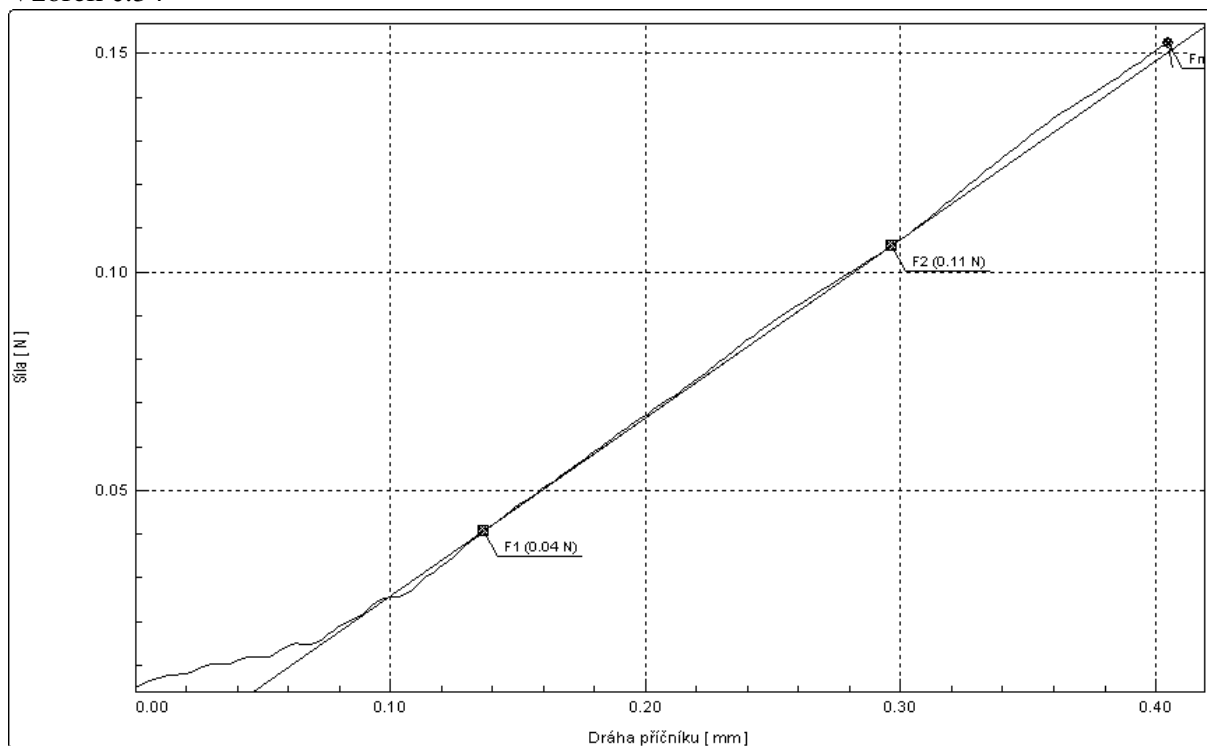
Vzorek č.32



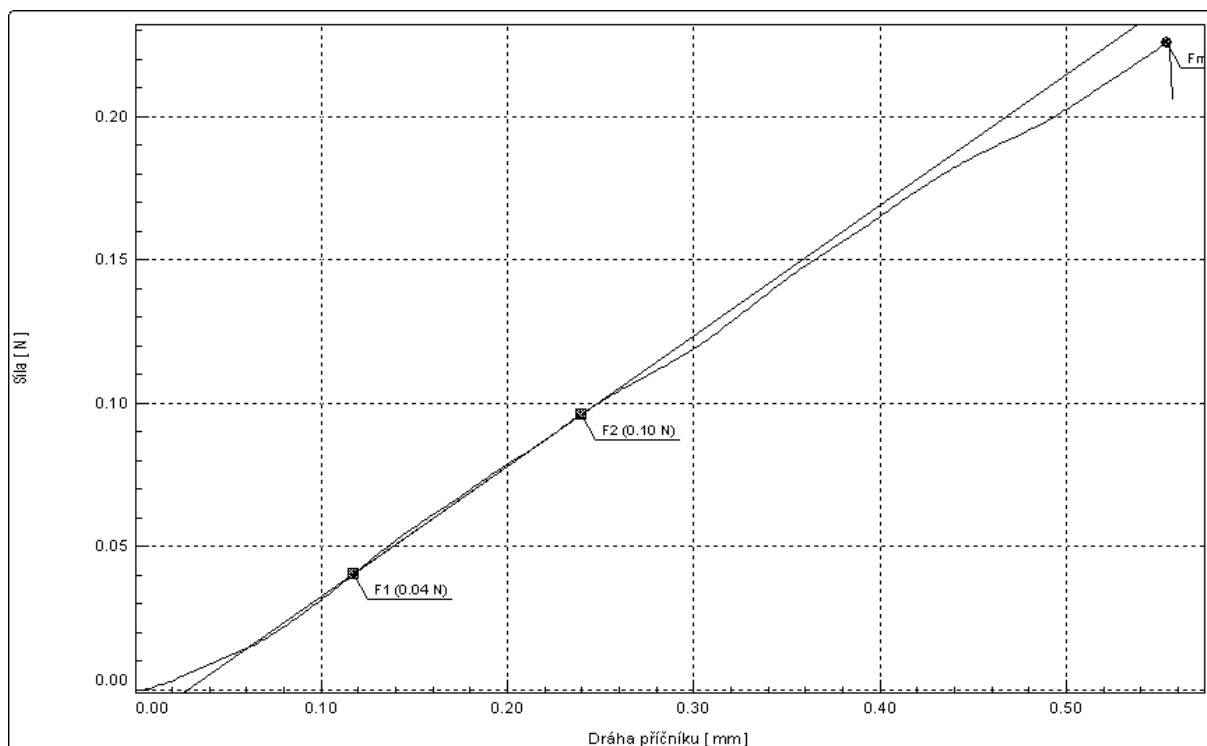
Vzorek č.33



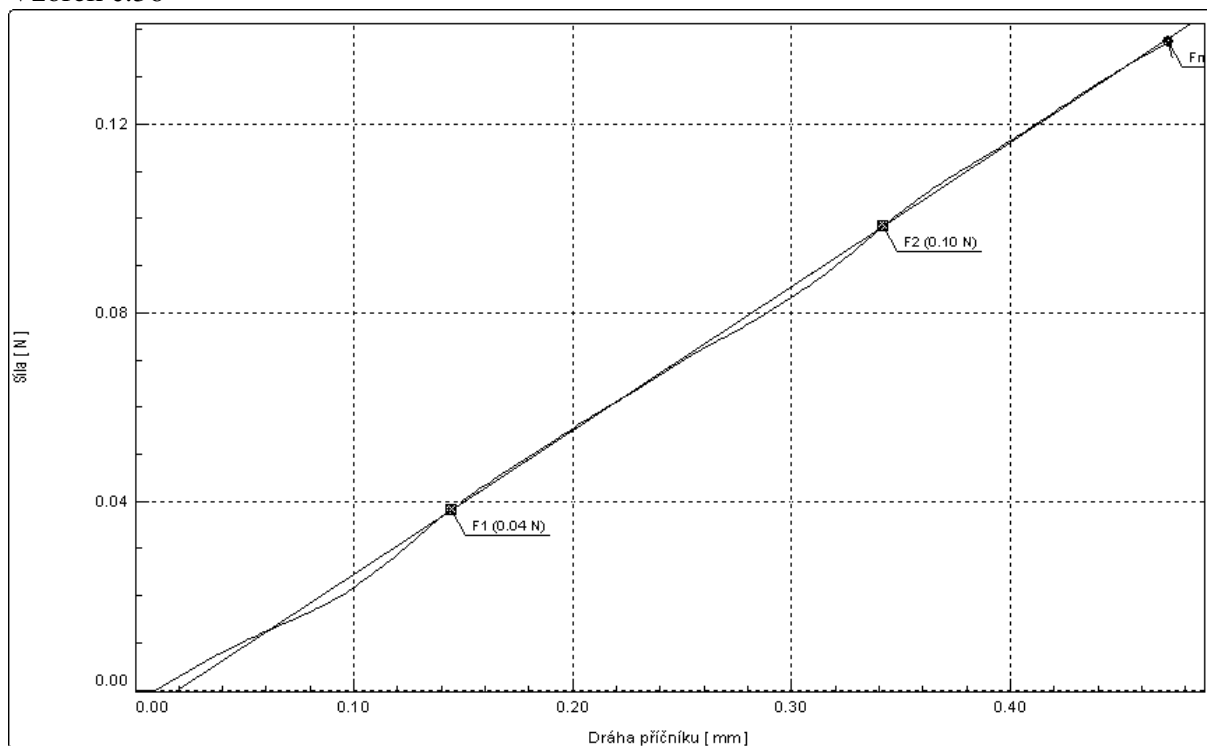
Vzorek č.34



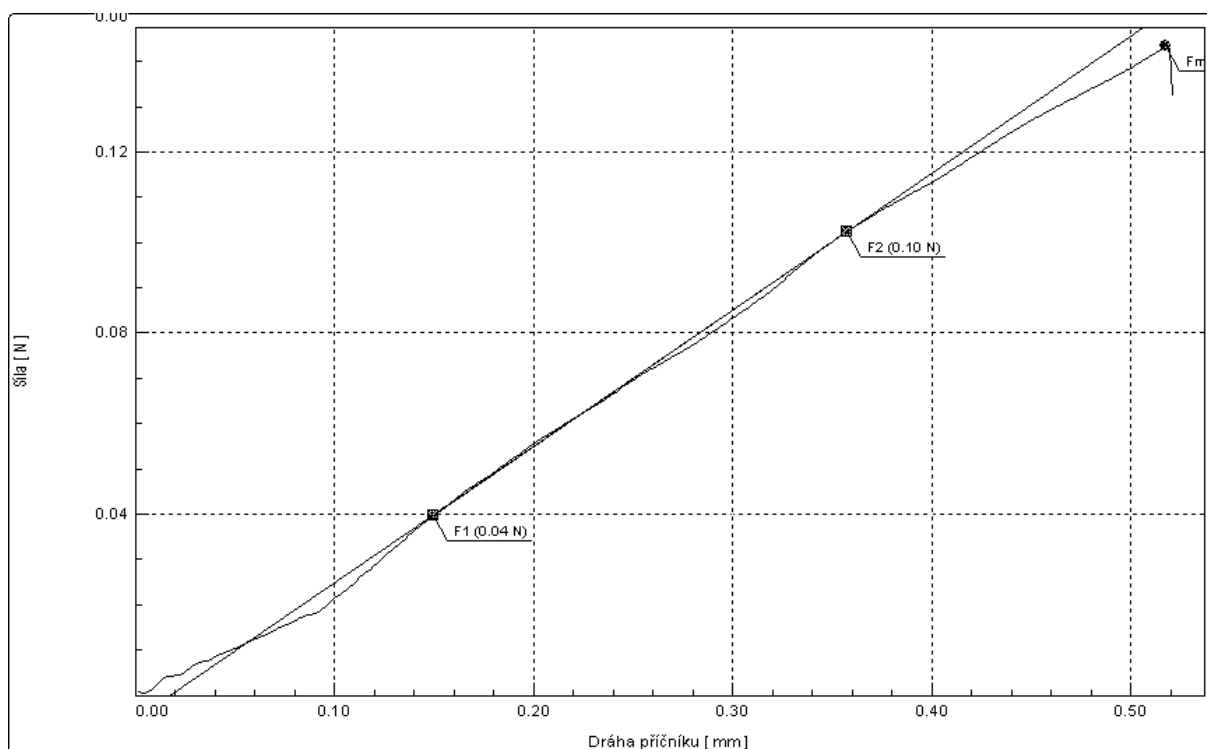
Vzorek č.35



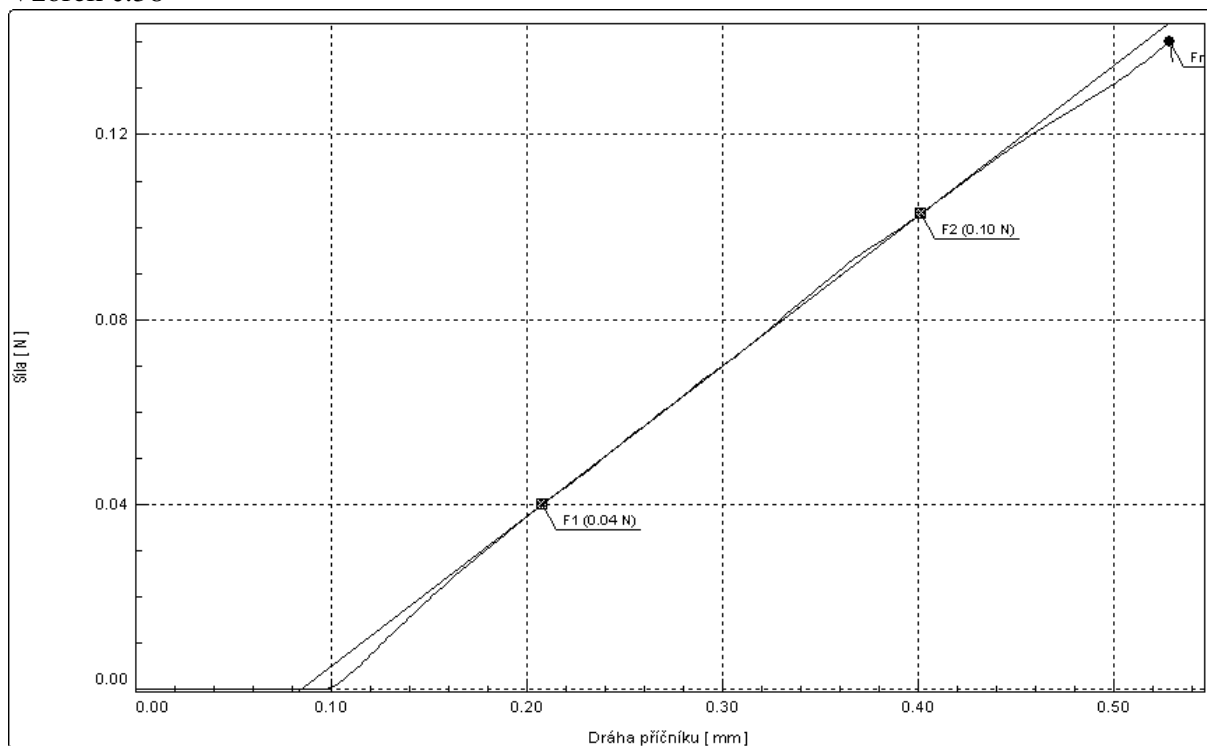
Vzorek č.36



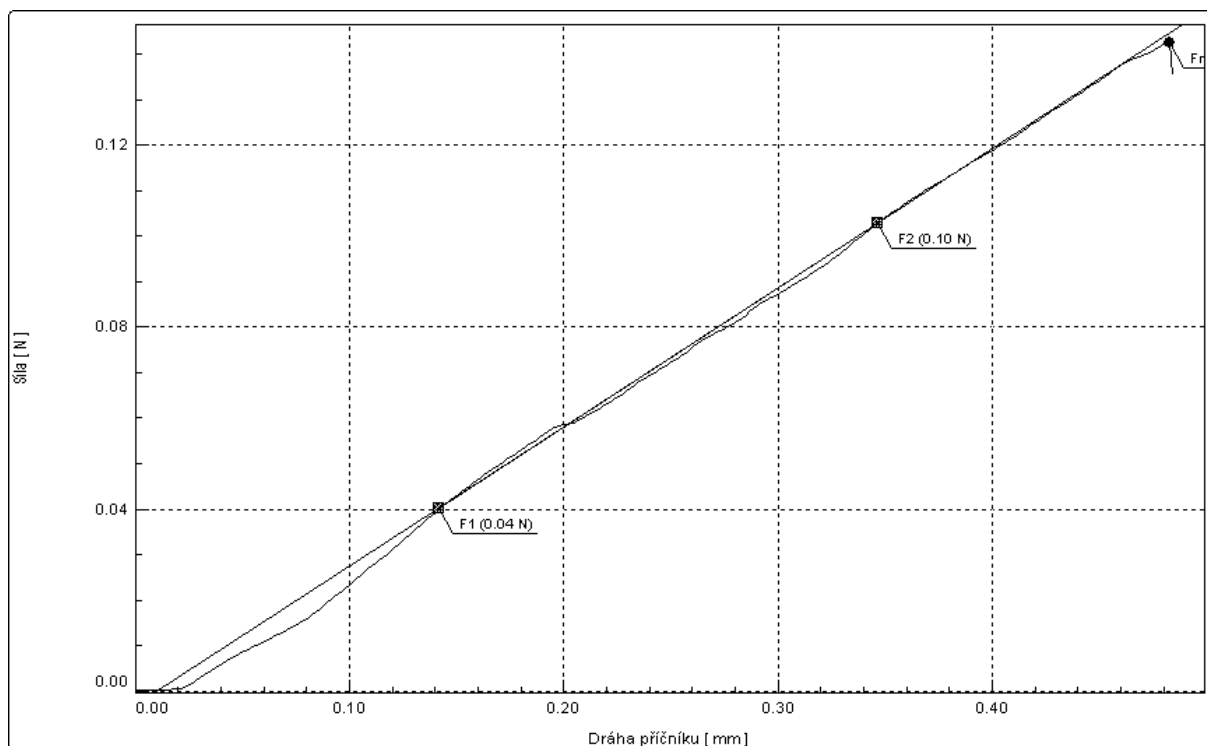
Vzorek č.37



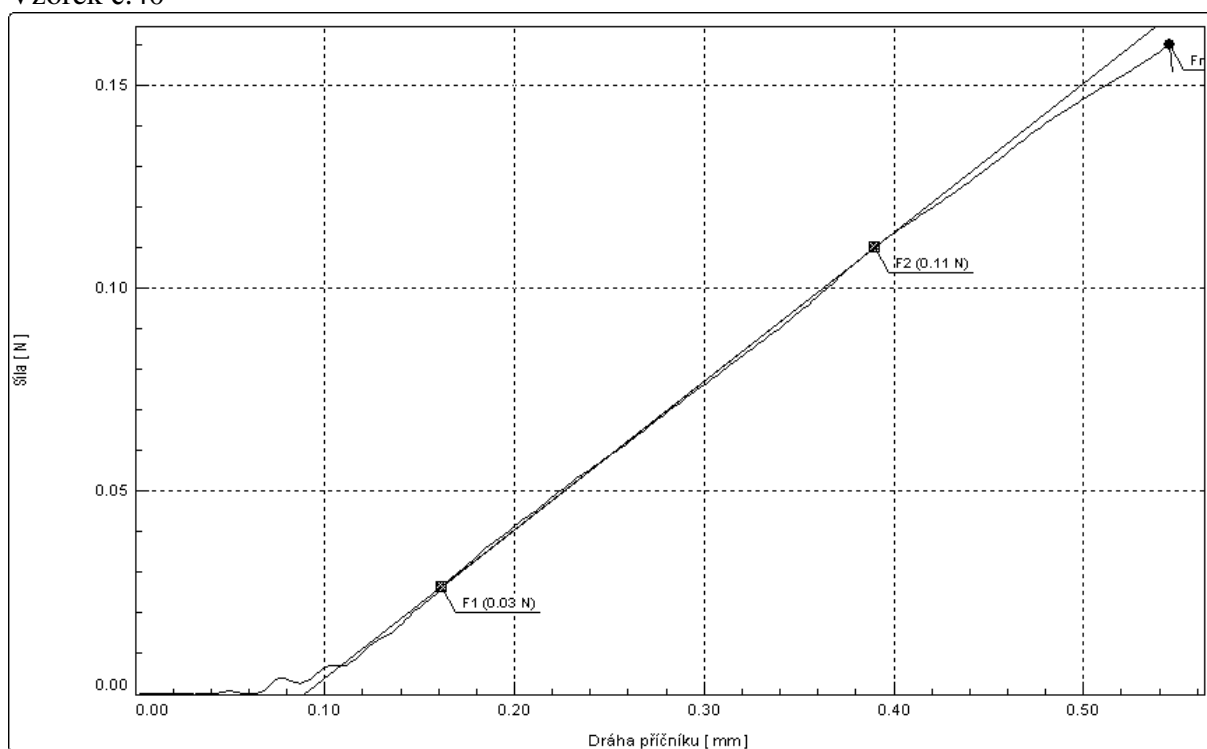
Vzorek č.38



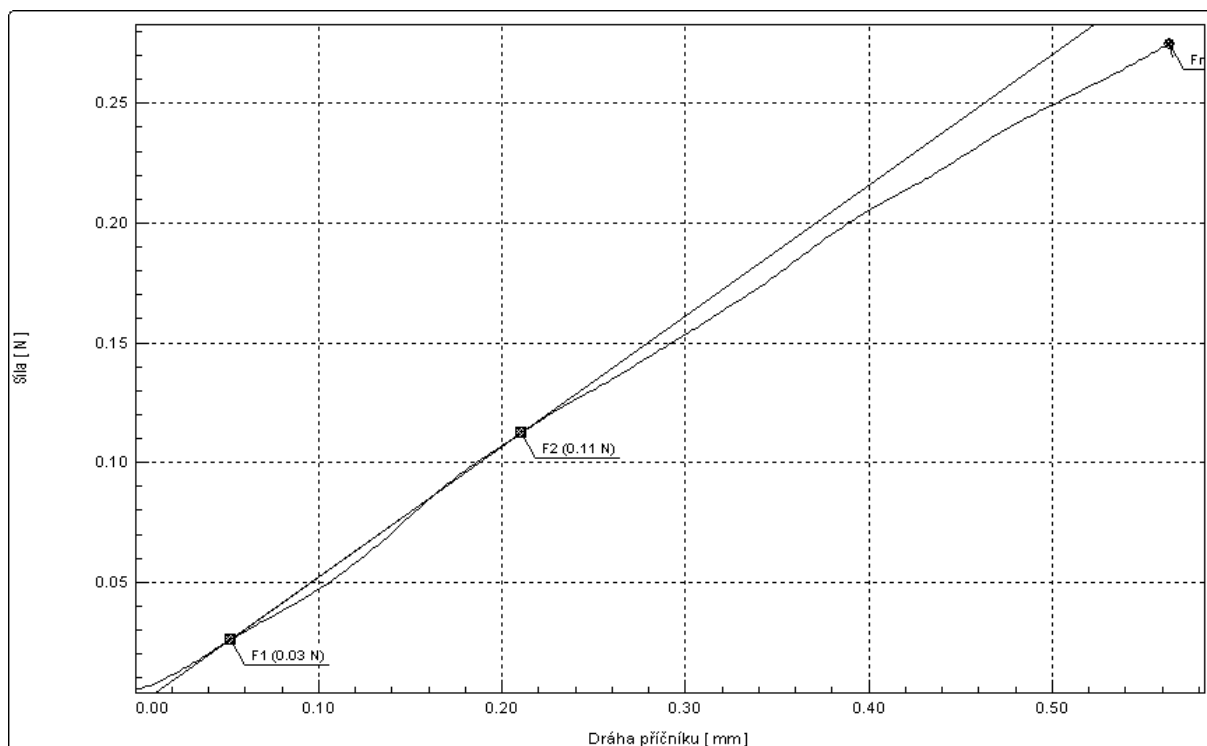
Vzorek č.39



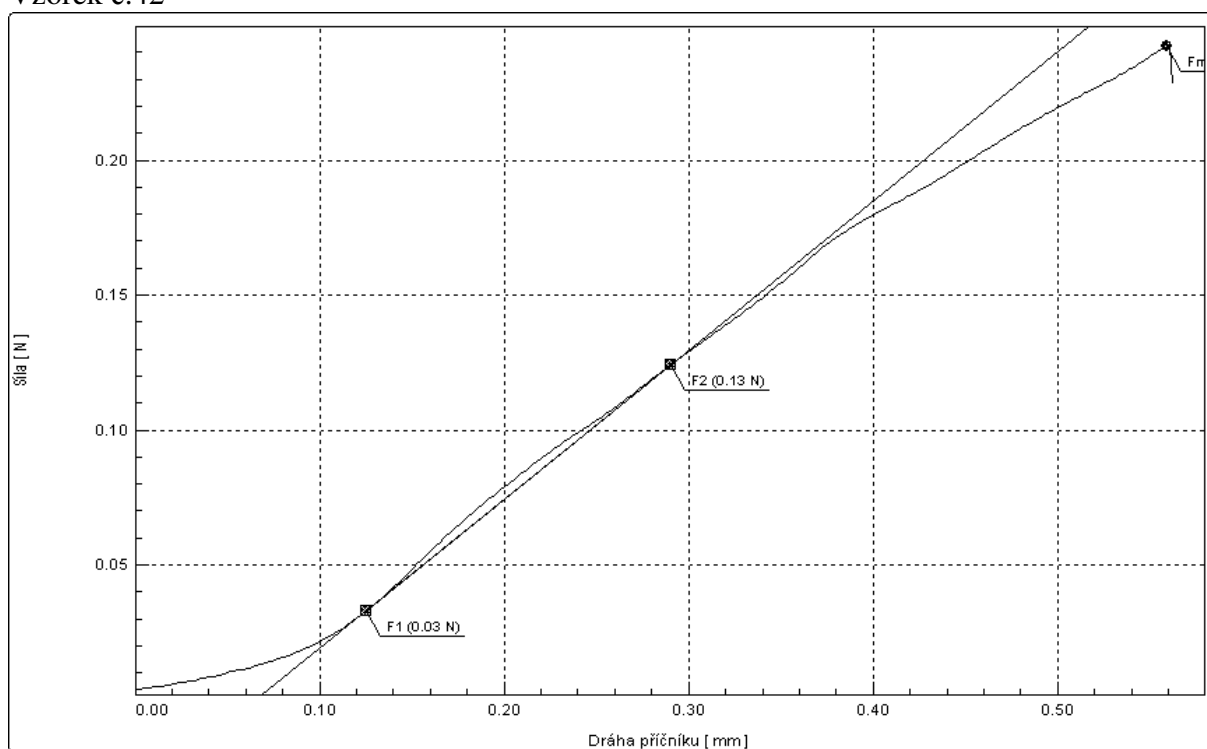
Vzorek č.40



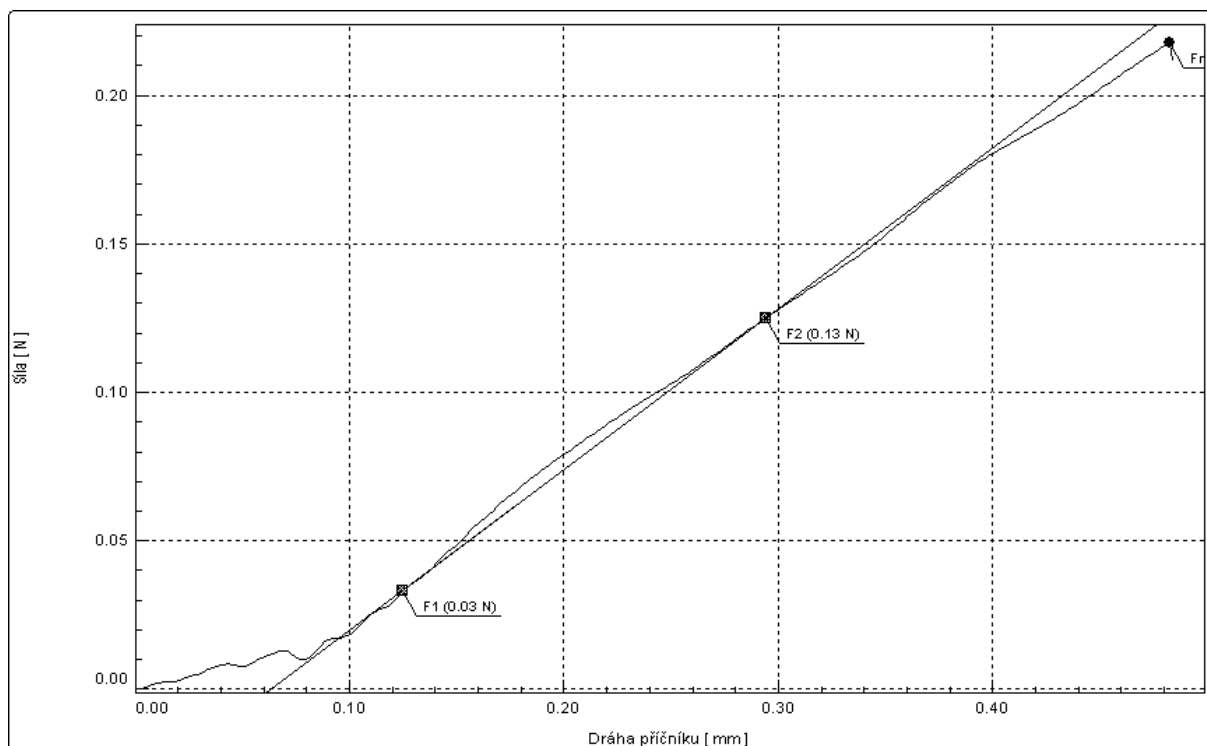
Vzorek č.41



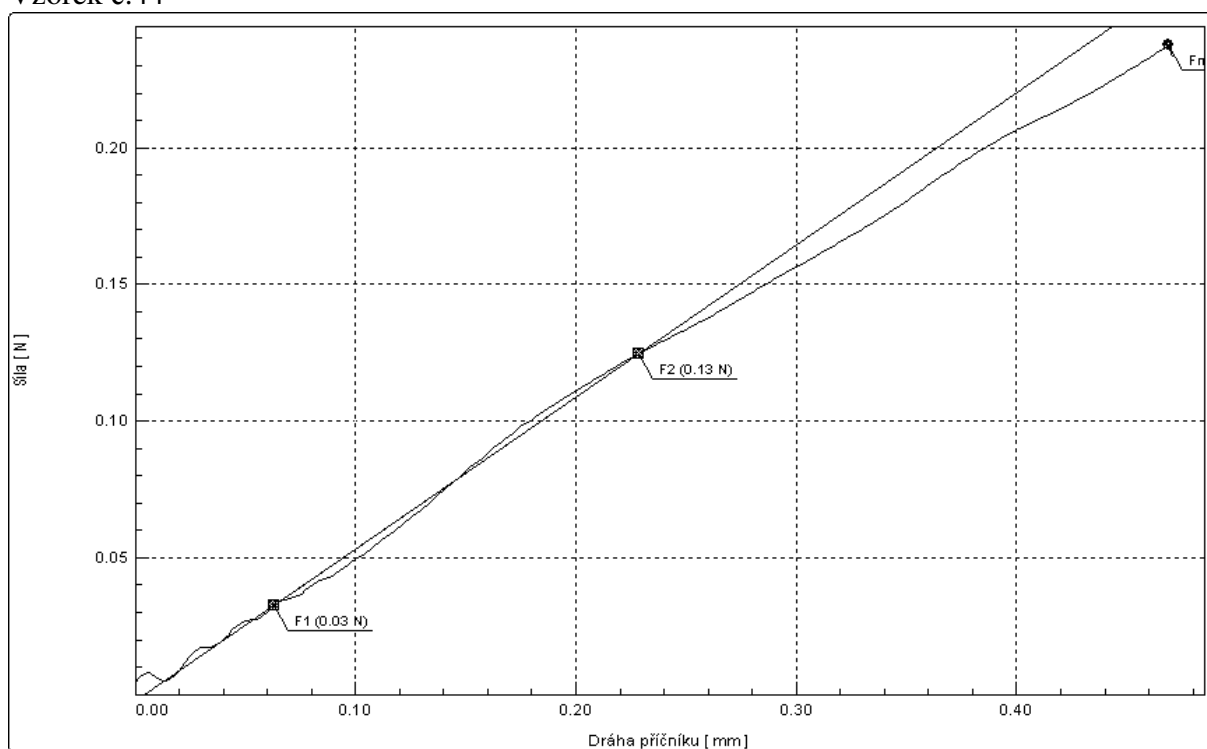
Vzorek č.42



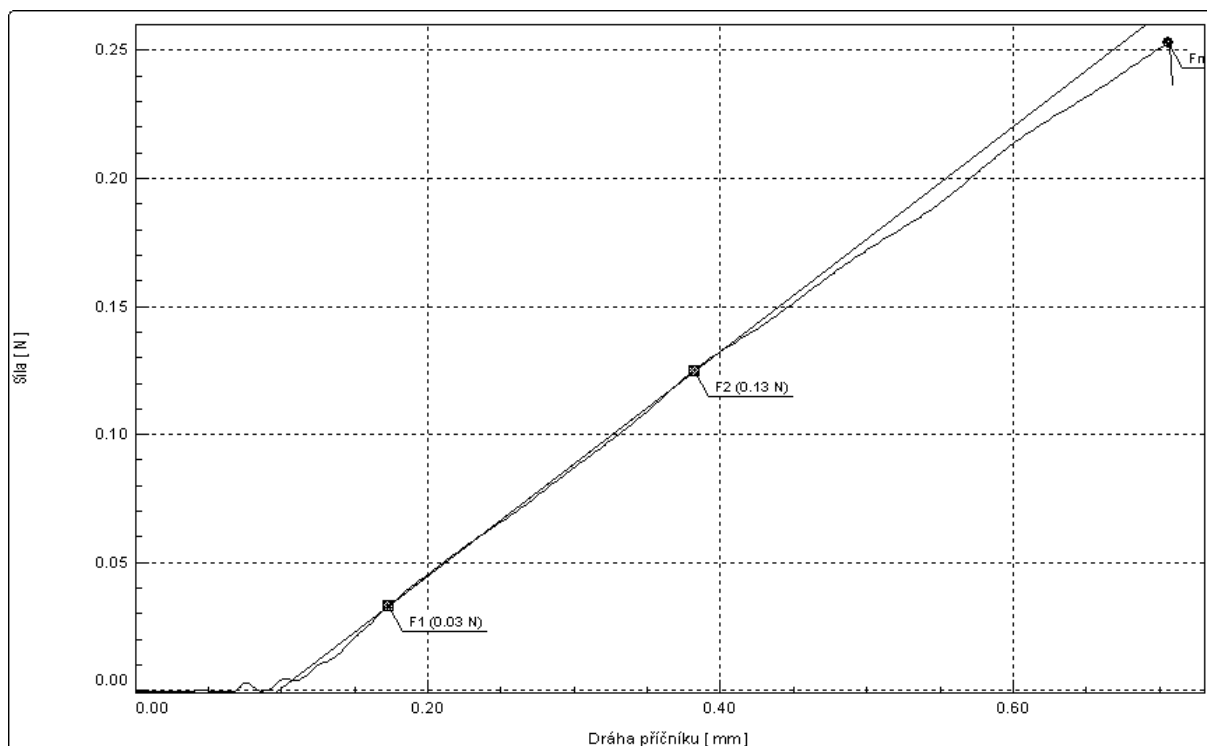
Vzorek č.43



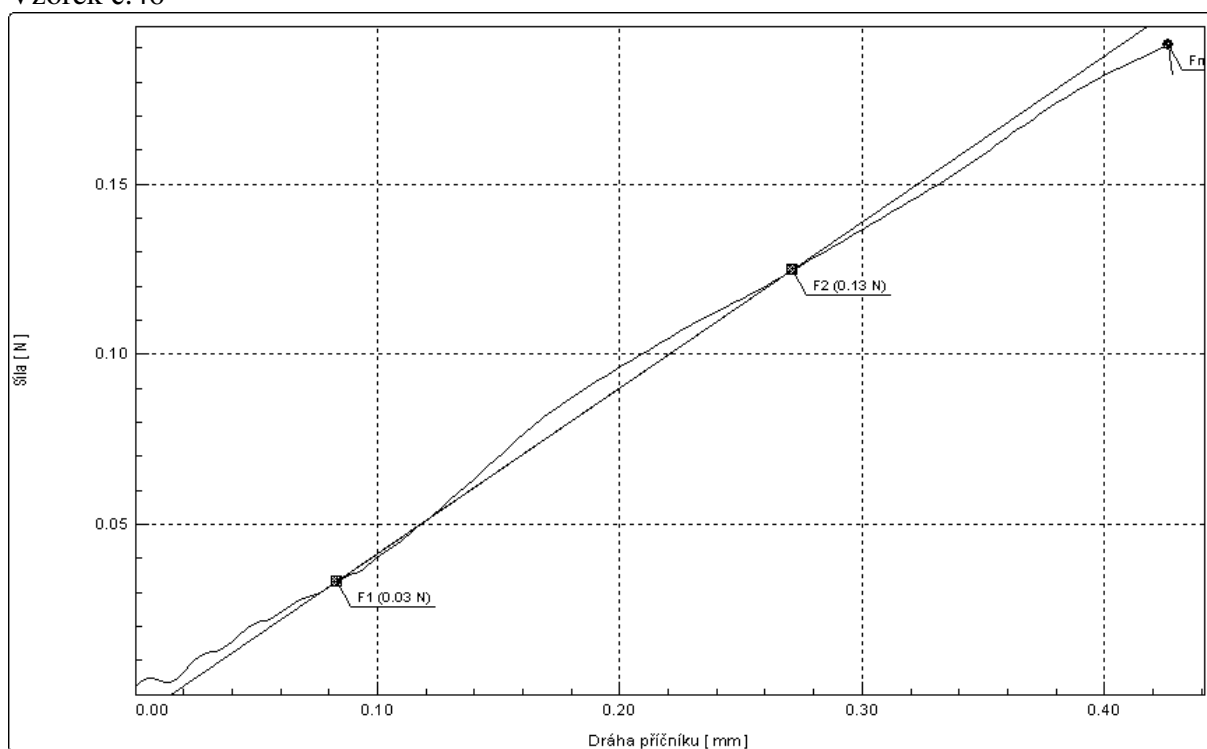
Vzorek č.44



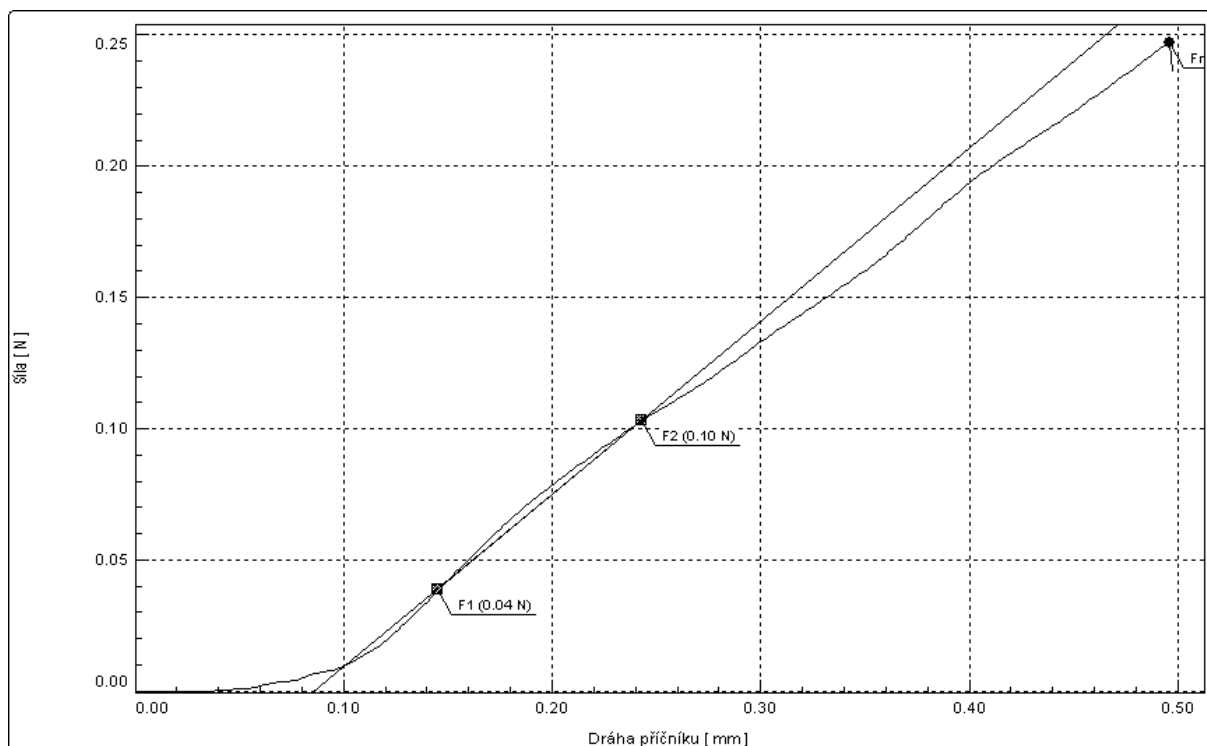
Vzorek č.45



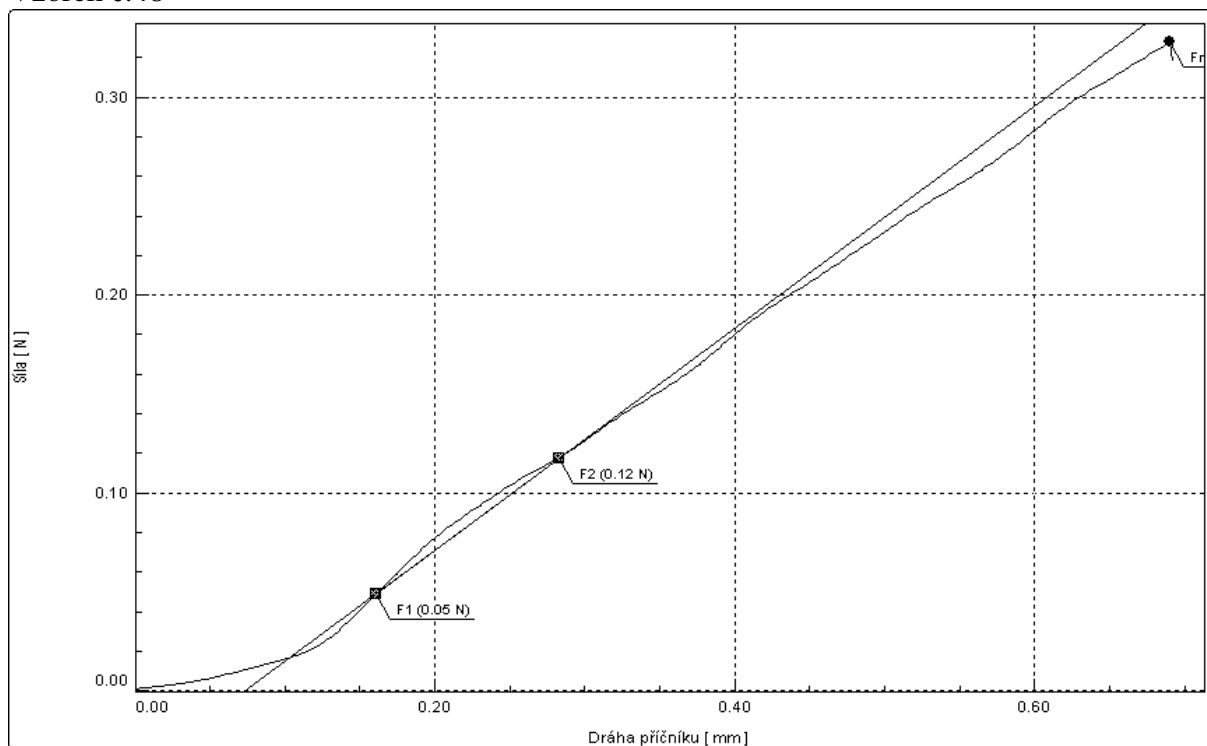
Vzorek č.46



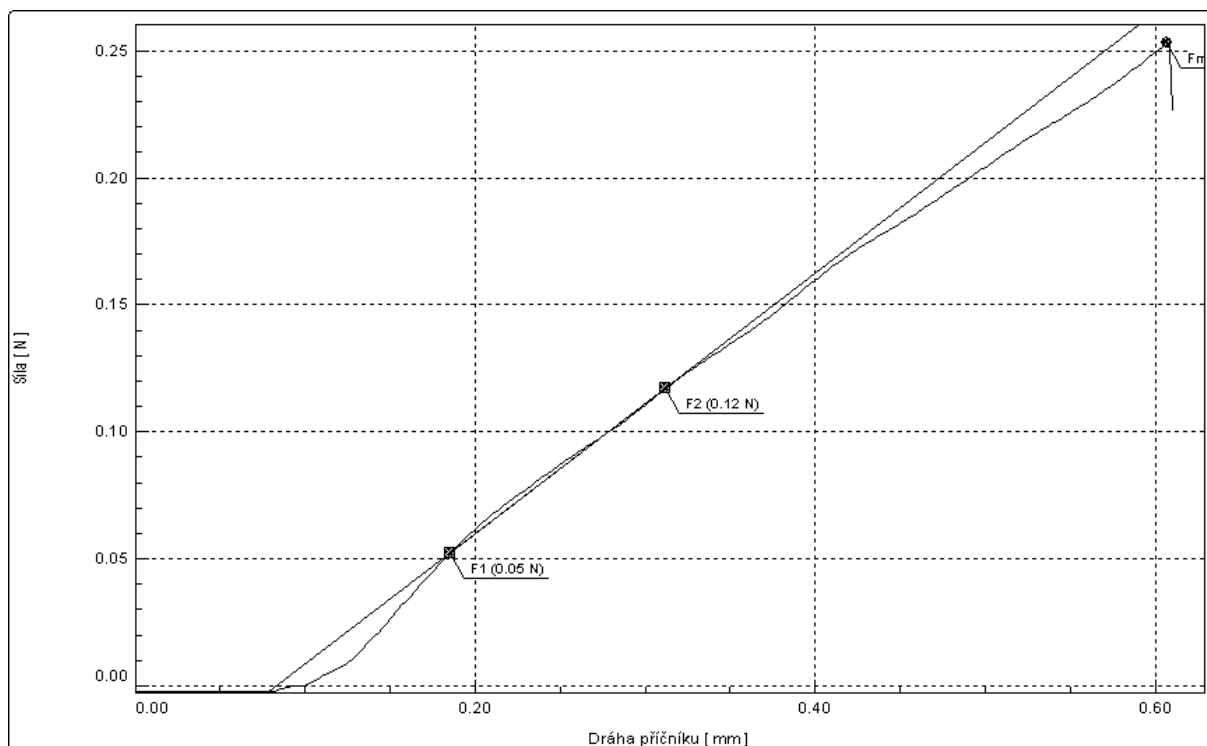
Vzorek č.47



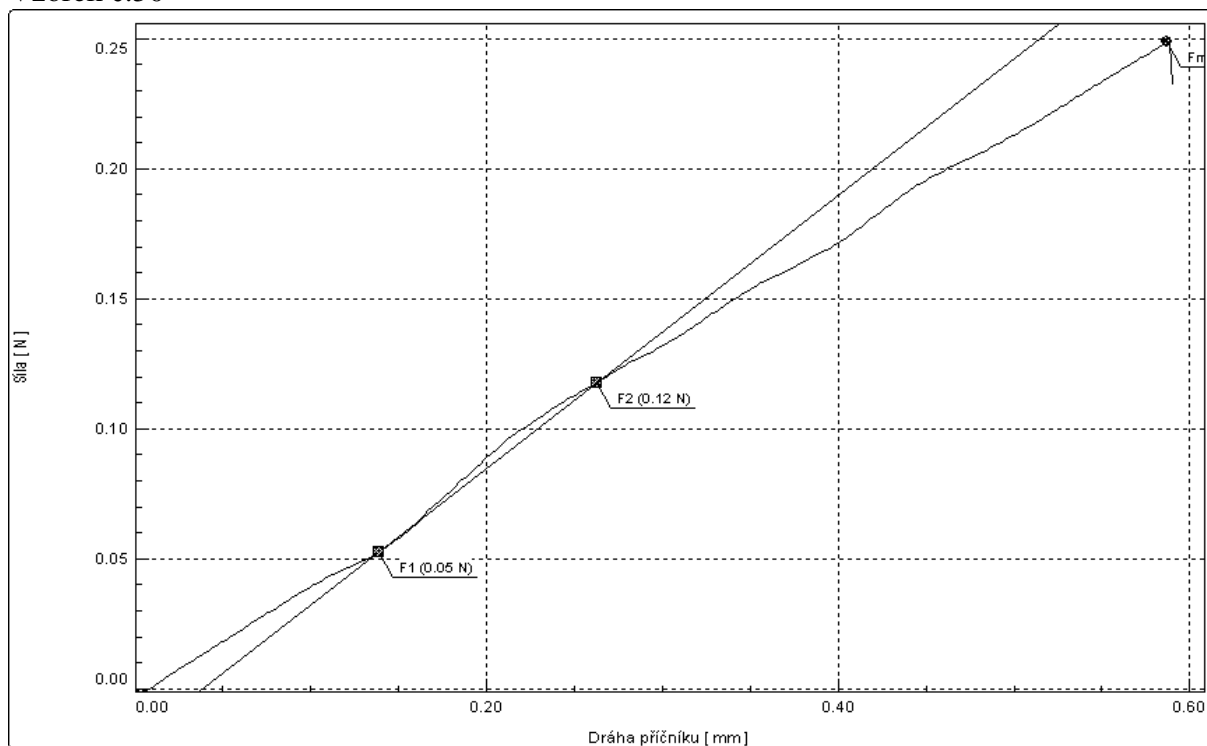
Vzorek č.48



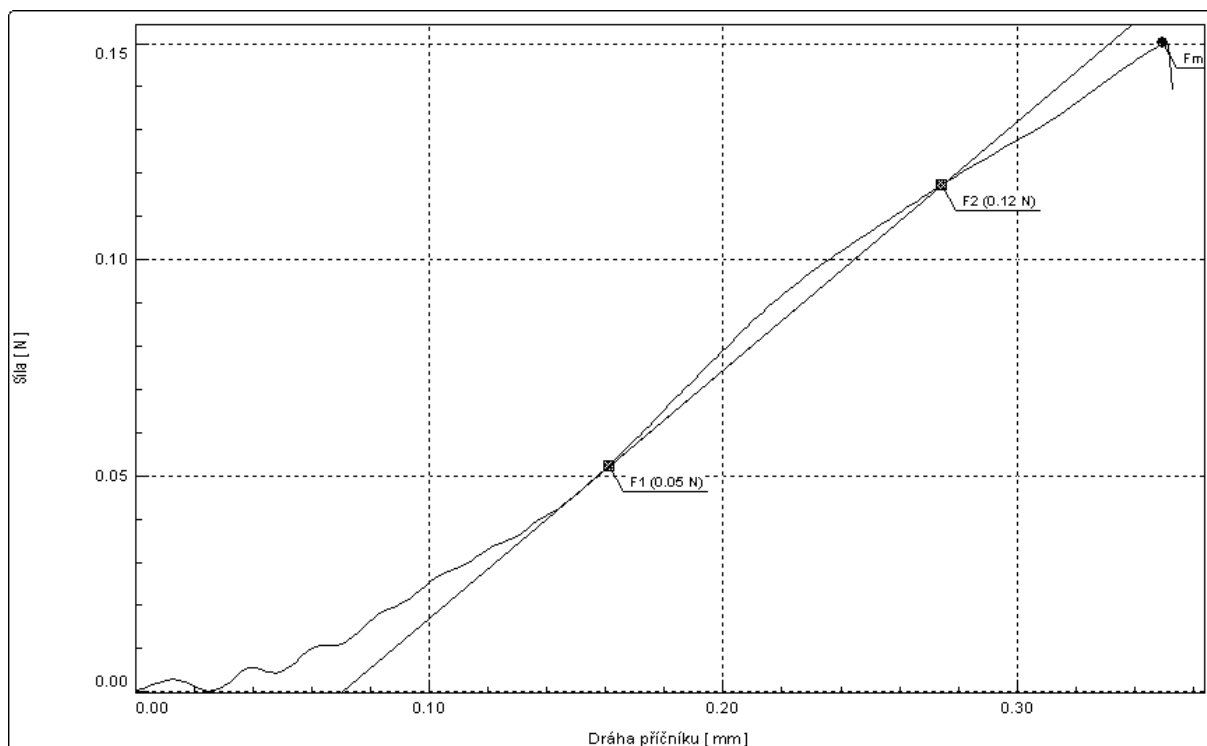
Vzorek č.49



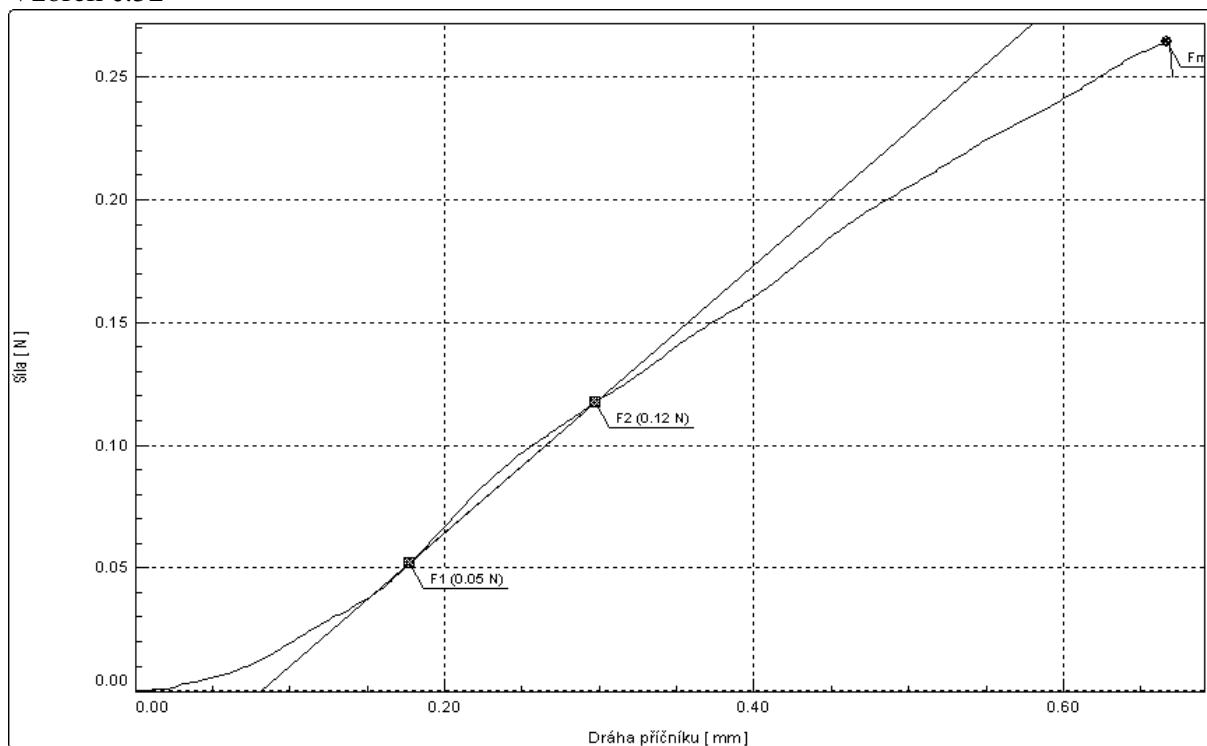
Vzorek č.50



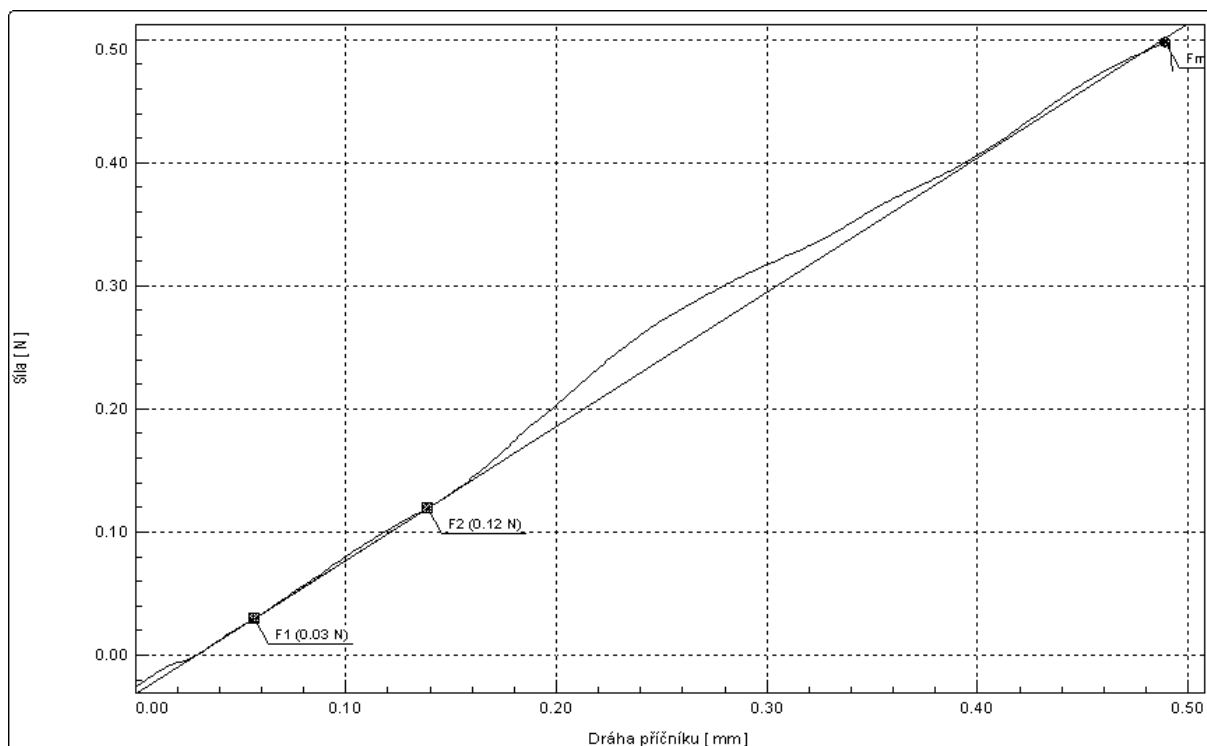
Vzorek č.51



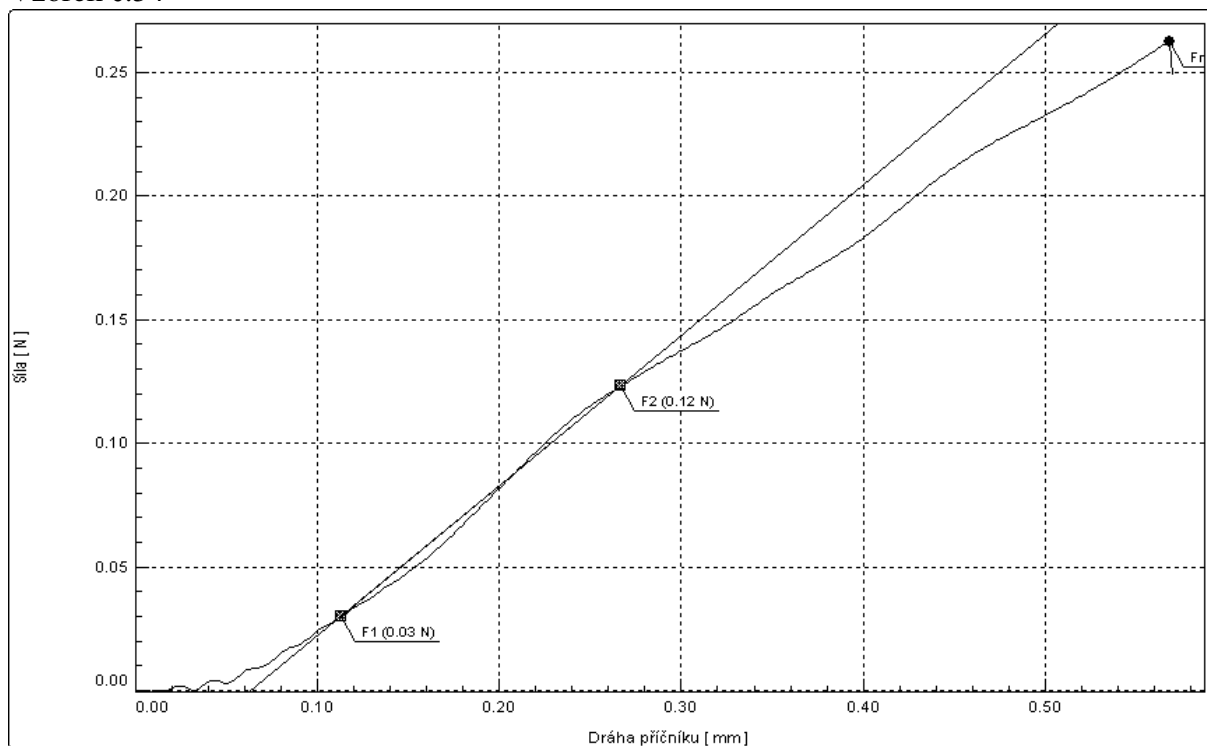
Vzorek č.52



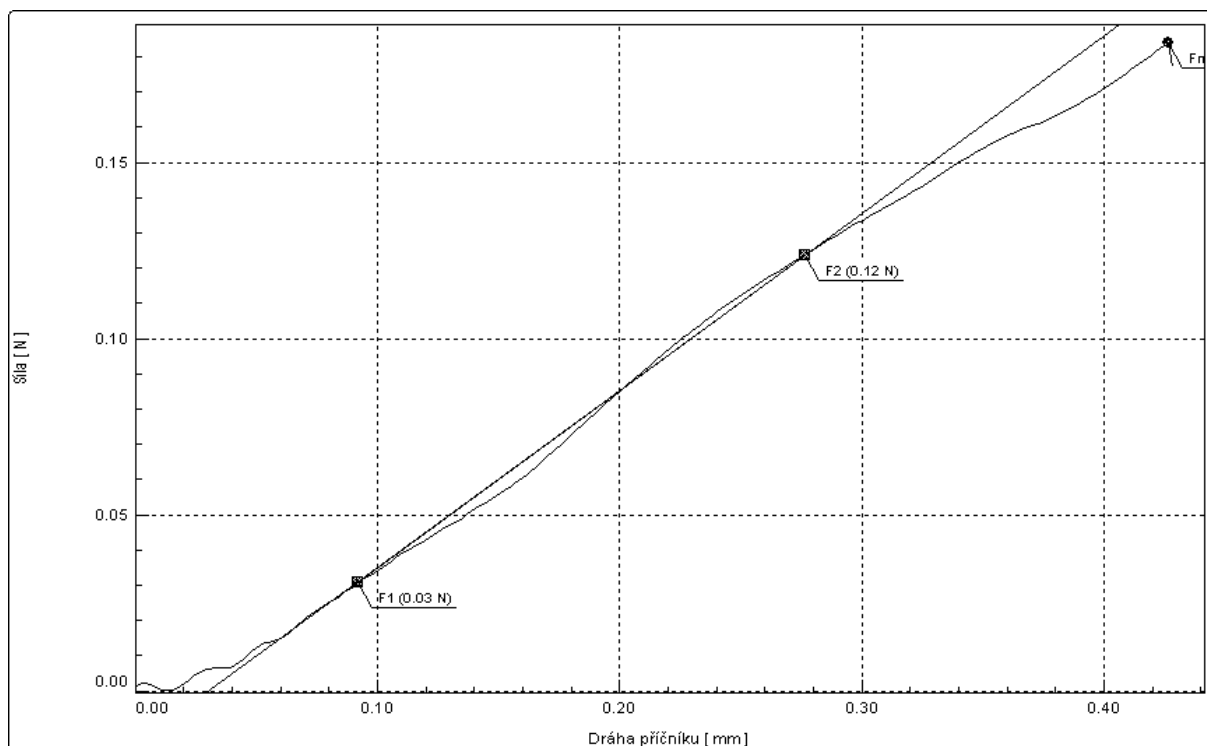
Vzorek č.53



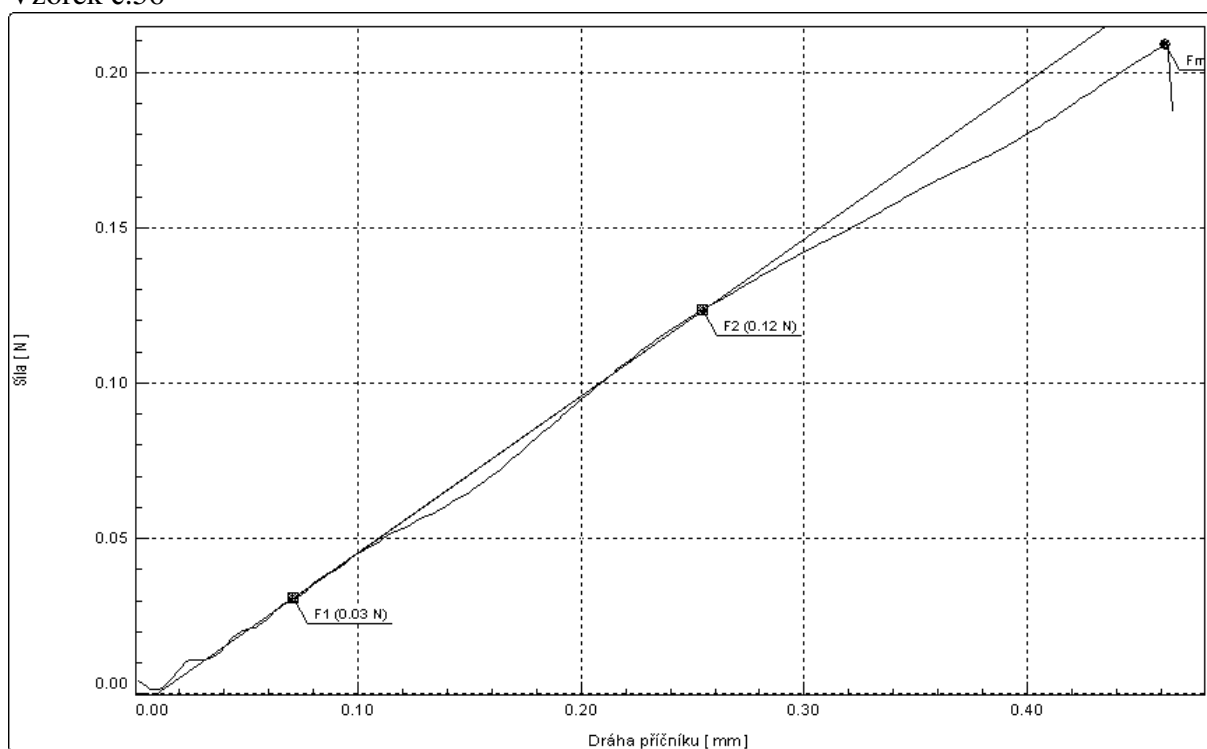
Vzorek č.54



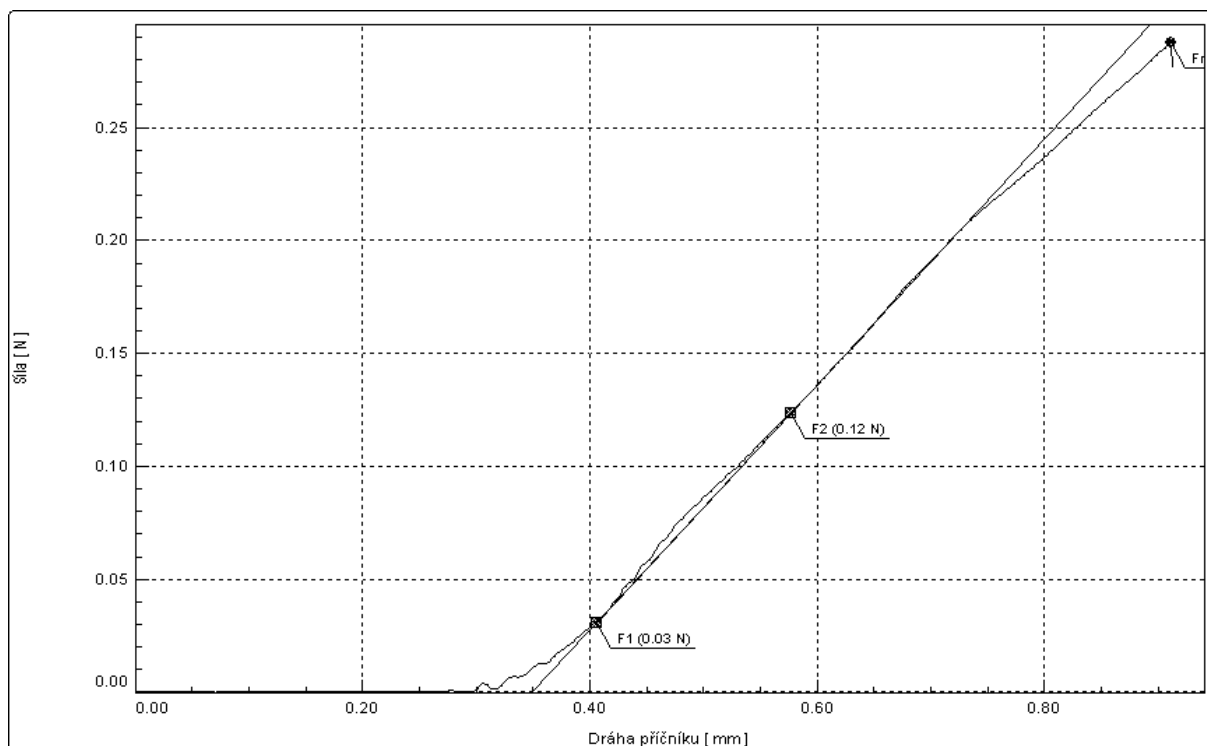
Vzorek č.55



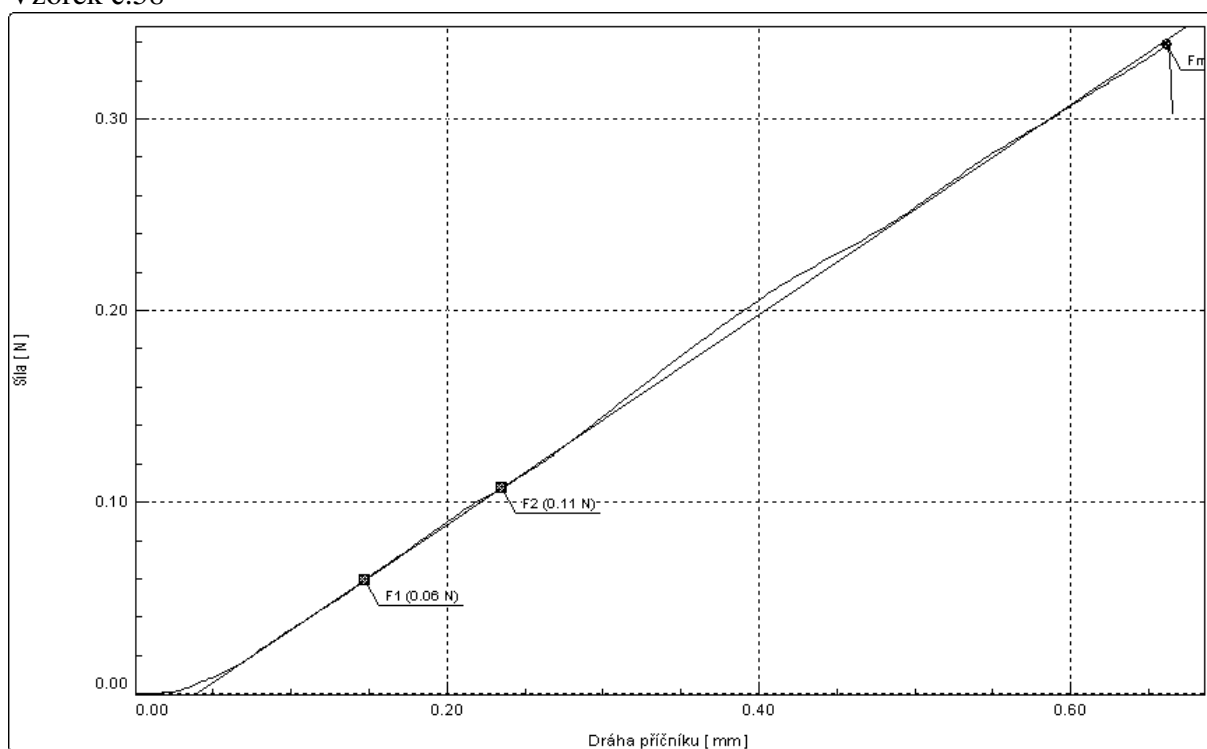
Vzorek č.56



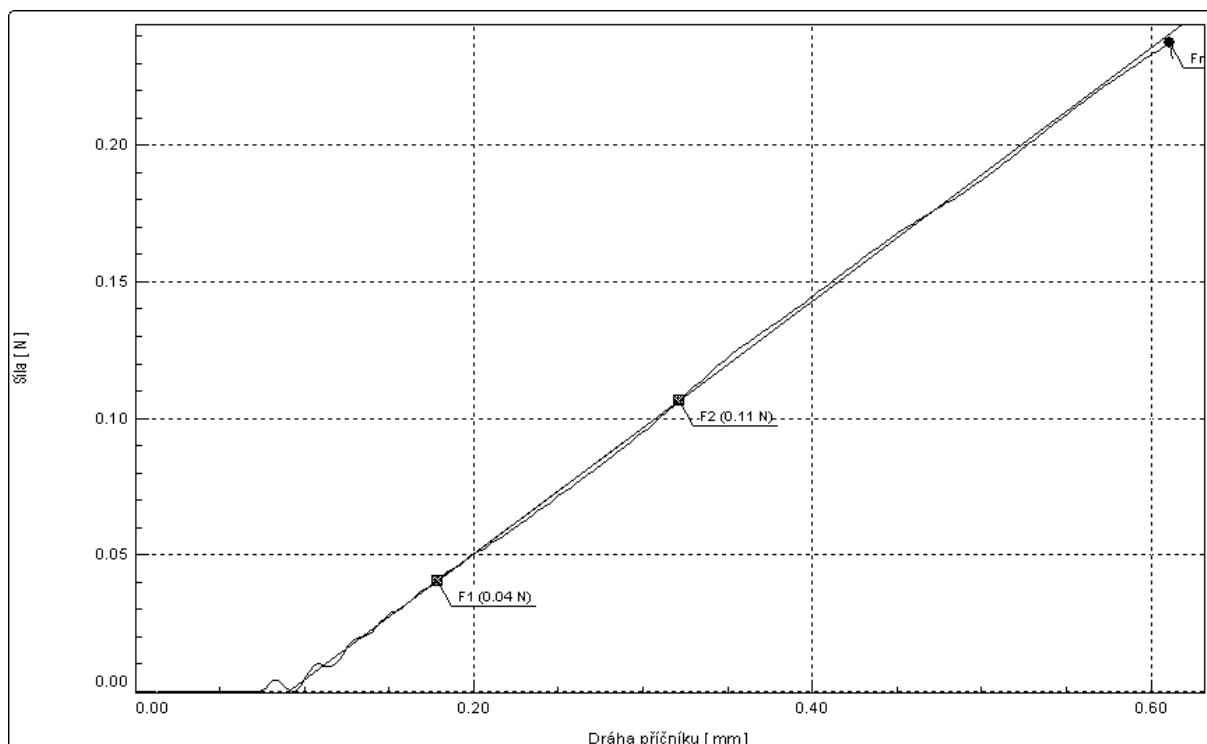
Vzorek č.57



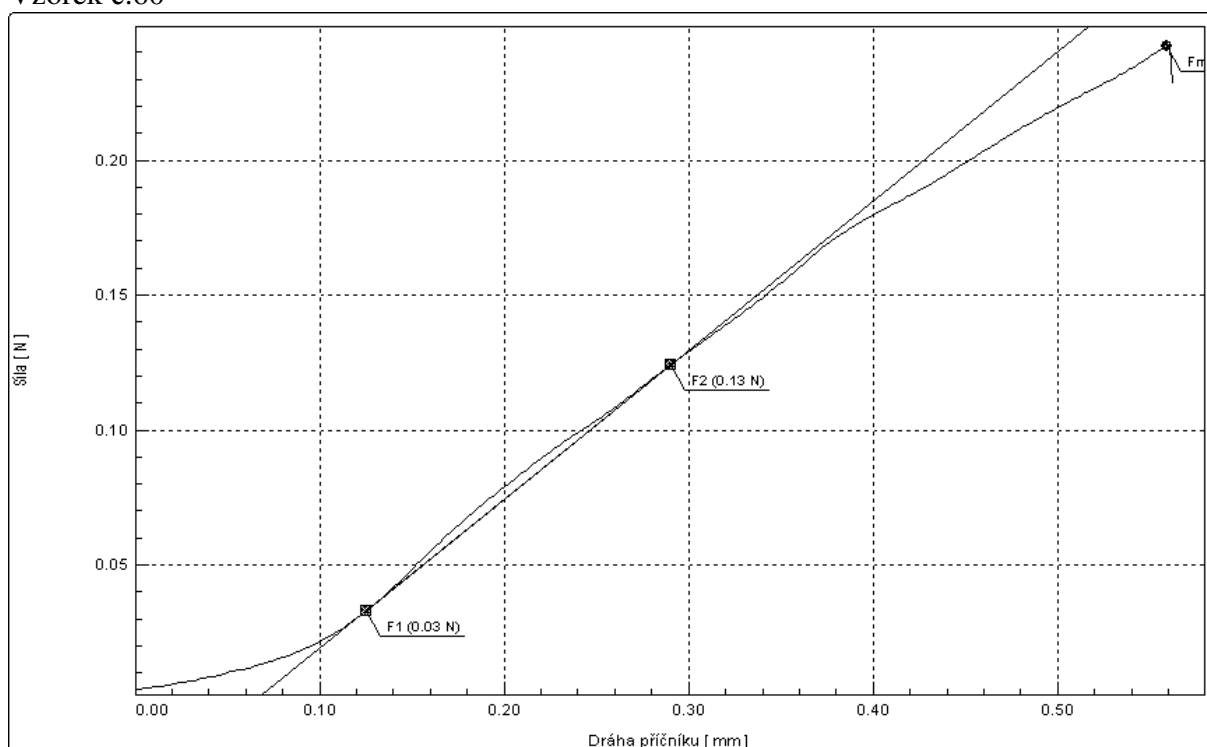
Vzorek č.58



Vzorek č.59

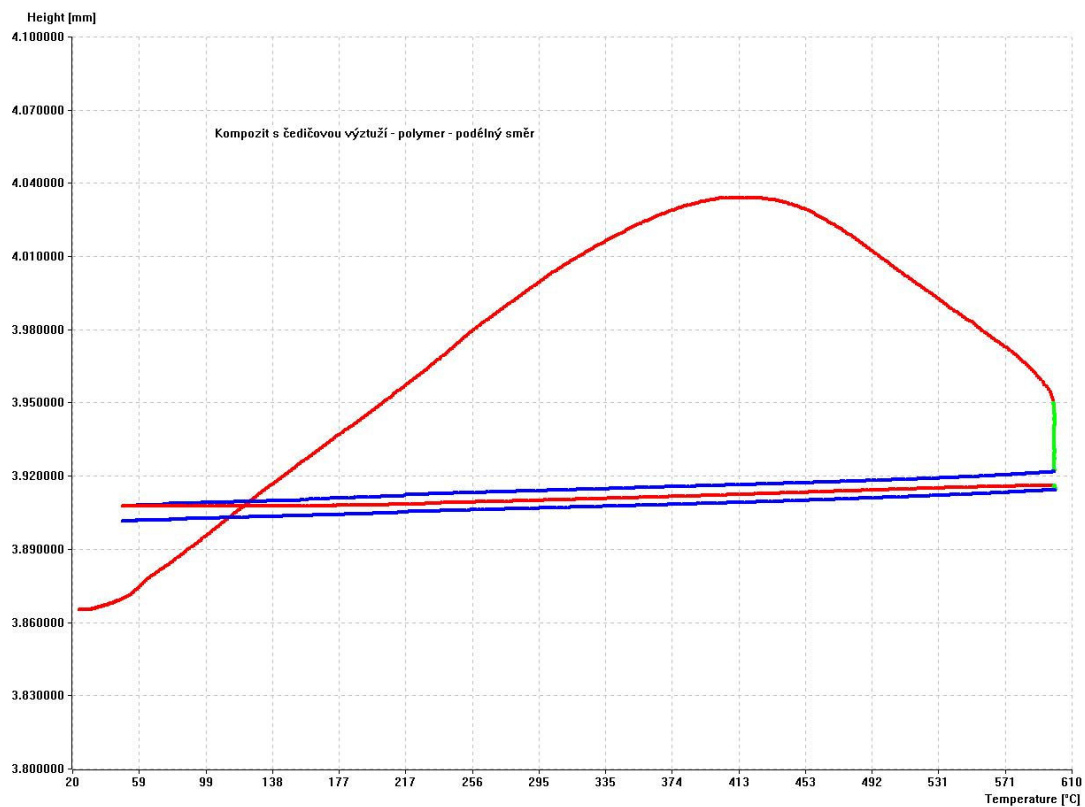


Vzorek č.60

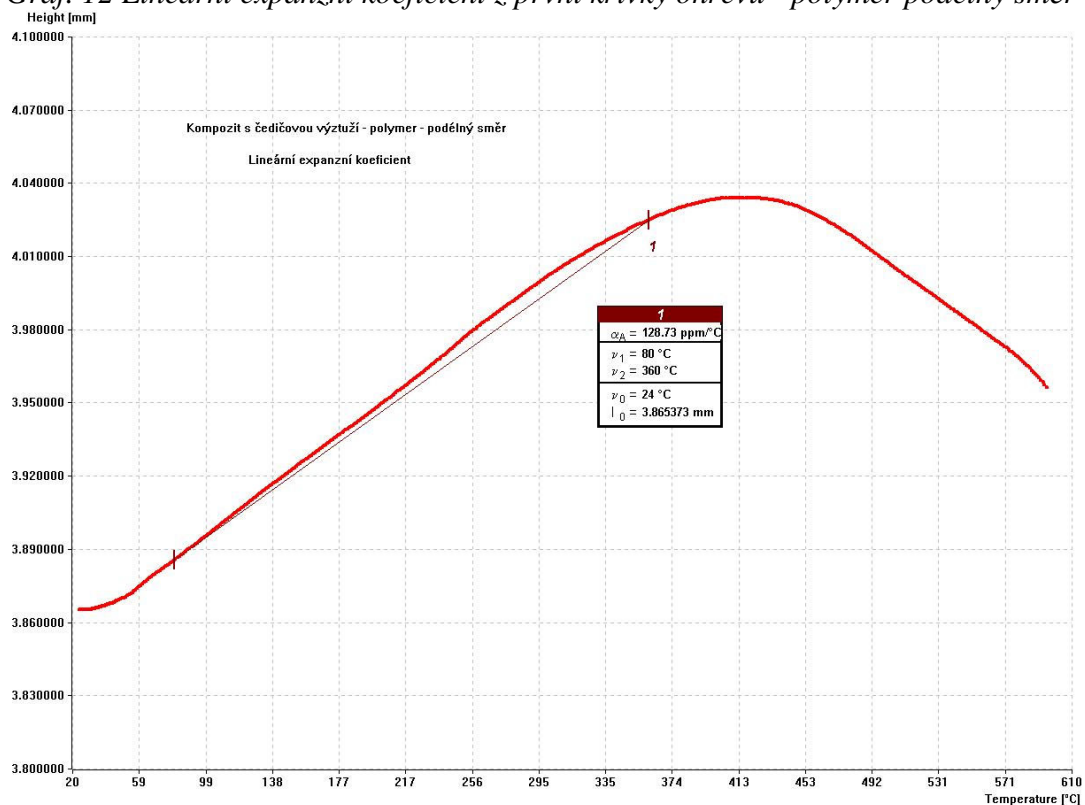


Měření vlastností kompozitu s čedičovou výztuží pomocí TMA

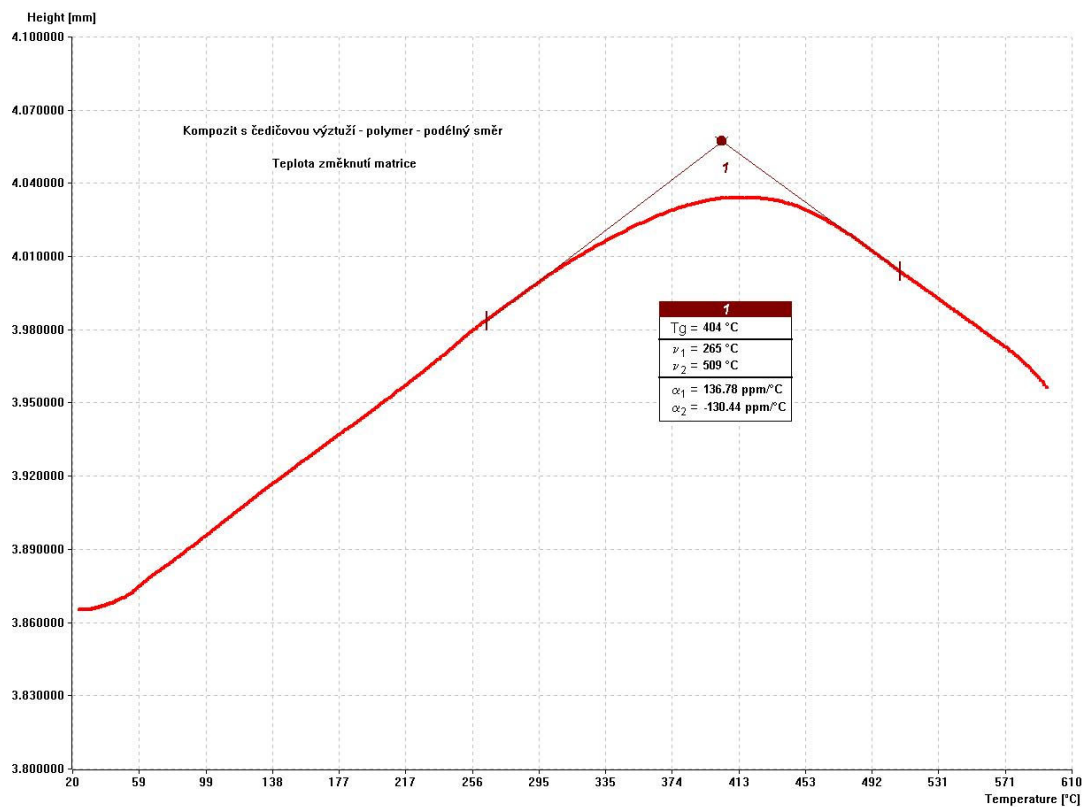
Graf. 11 Dilatační křivky - polymer podélný směr



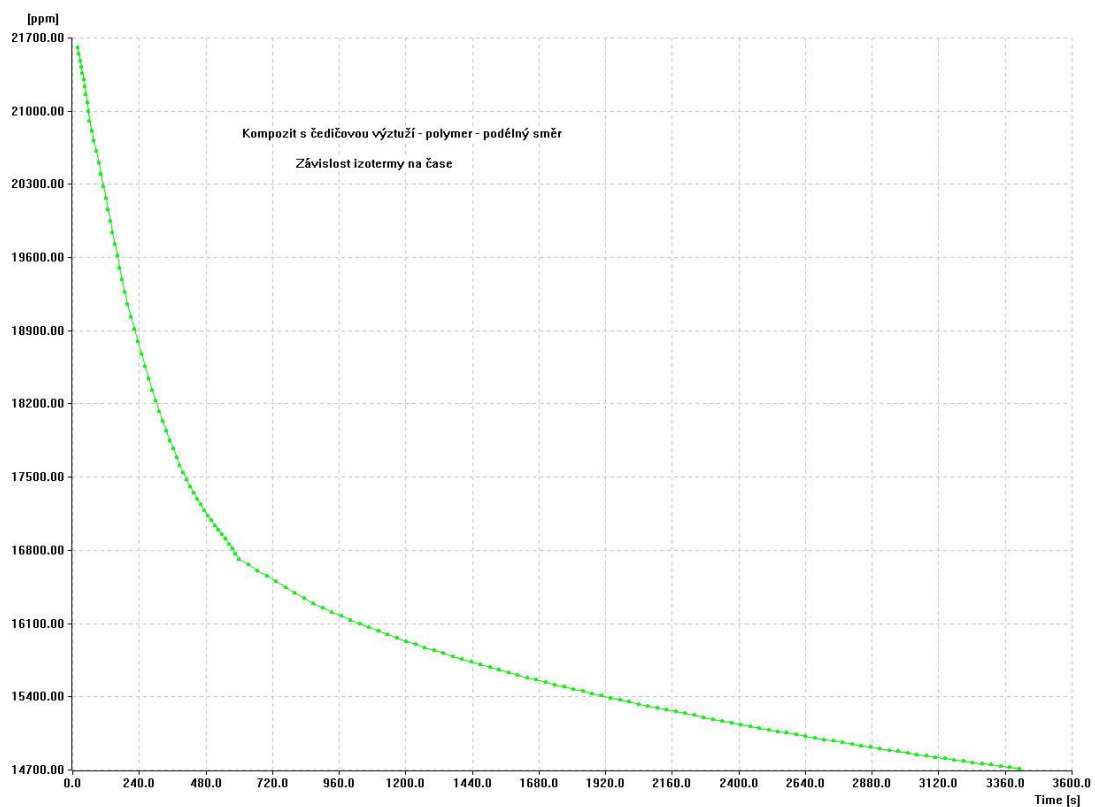
Graf. 12 Lineární expanzní koeficient z první křivky ohřevu - polymer podélný směr



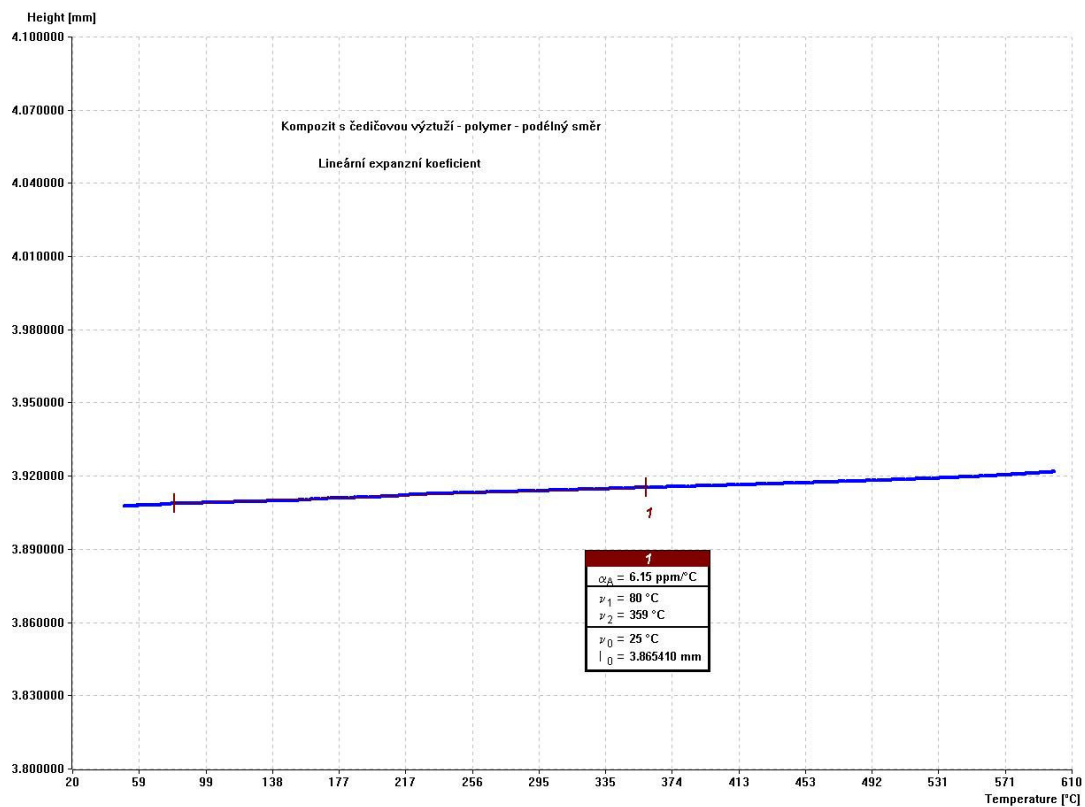
Graf. 13 Teplota změknutí matrice z první křivky ohřevu - polymer podélný směr



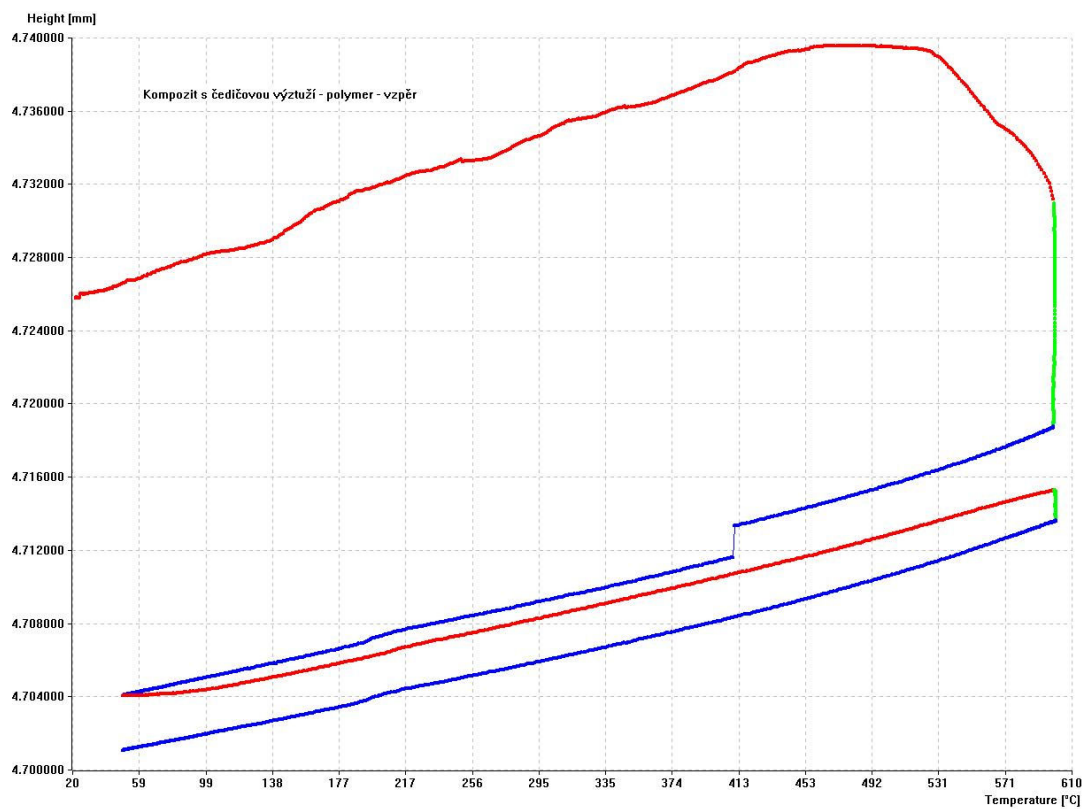
Graf. 14 Závislost izotermny na čase (časová prodleva) - polymer podélný směr



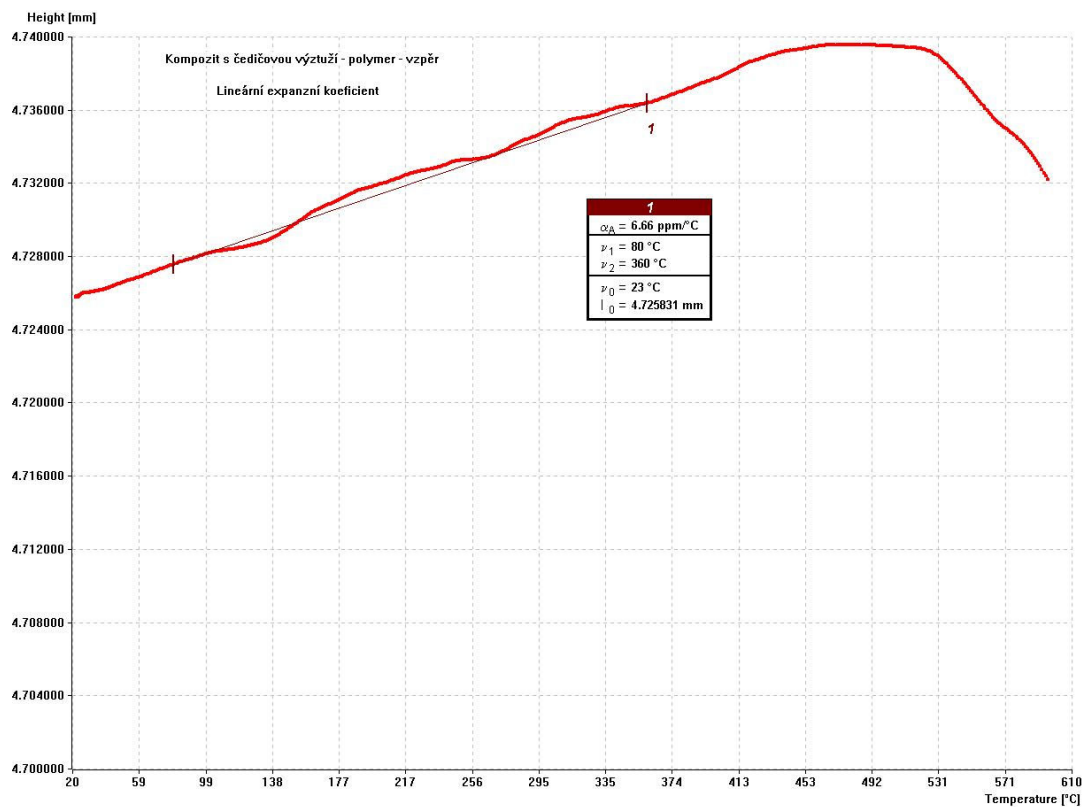
Graf. 15 Lineární expanzí koeficient z třetí křivky chlazení - polymer podélný směr



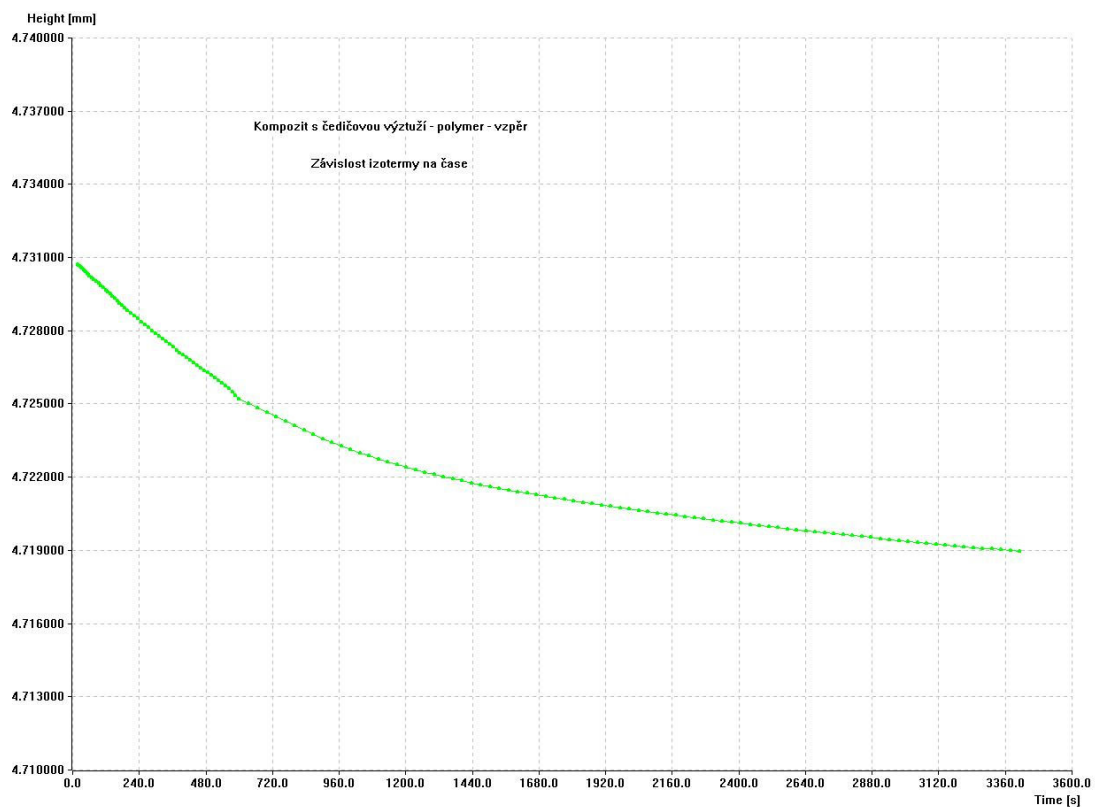
Graf. 16 Dilatační křivky – polymer vzpěr



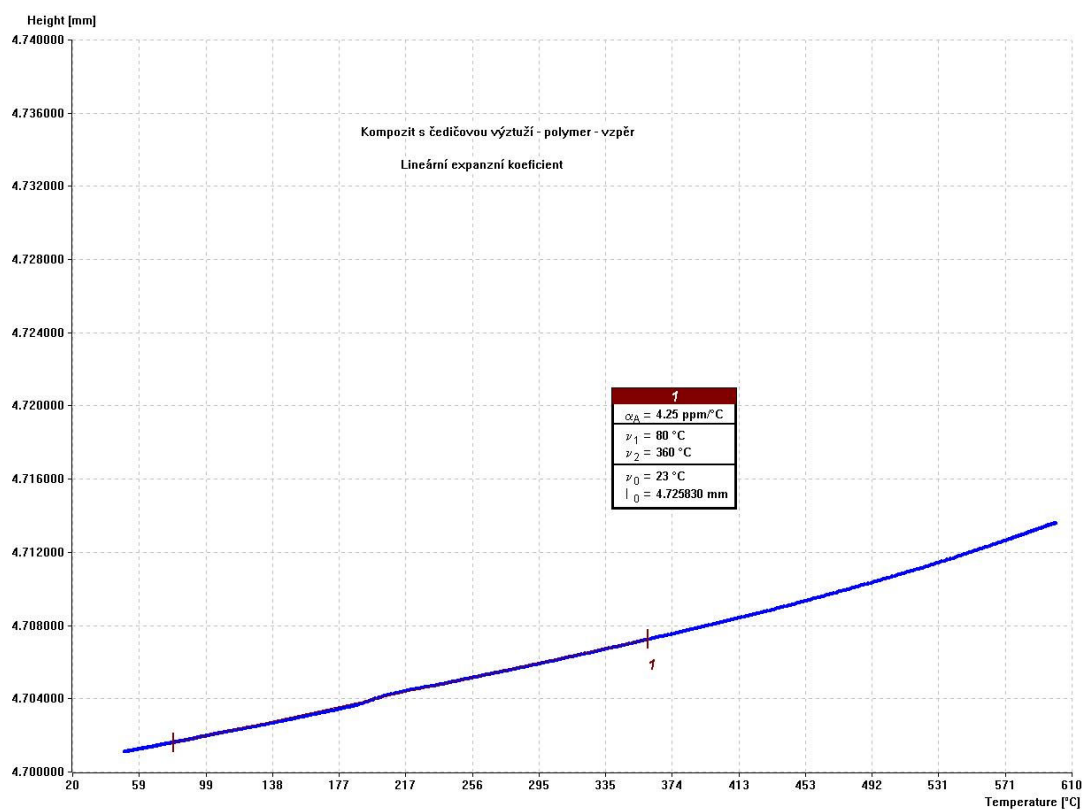
Graf. 17 Lineární expanzní koeficient z první křivky ohřevu – polymer vzpěr



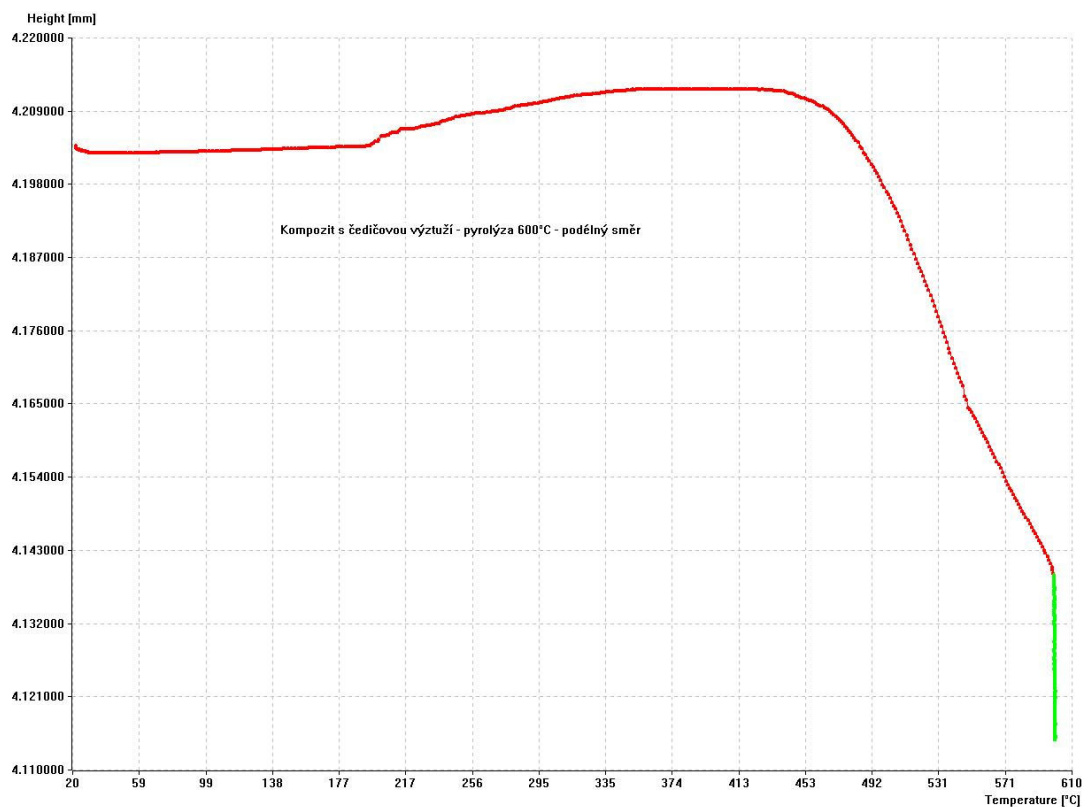
Graf. 18 Závislost izotermny na čase (časová prodleva) – polymer vzpěr



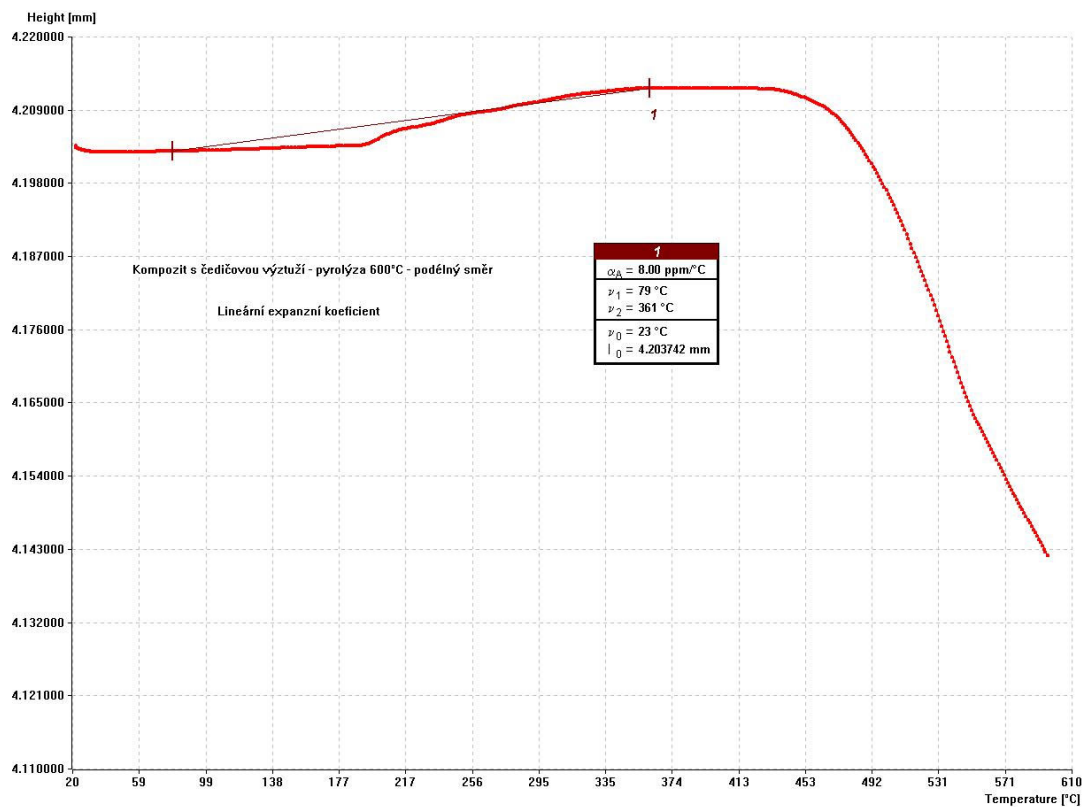
Graf. 19 Lineární expanzní koeficient z šesté křivky chlazení – polymer vzpěr



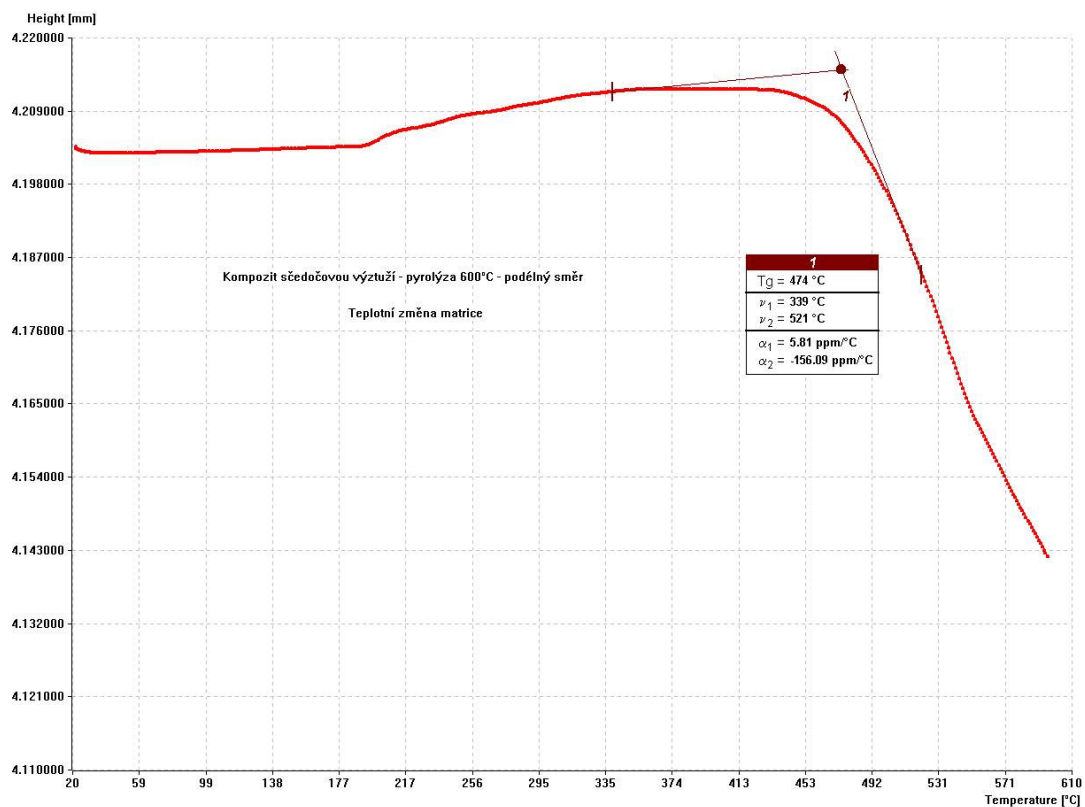
Graf. 20 Dilatační křivky - pyrolýza 600°C podélný směr



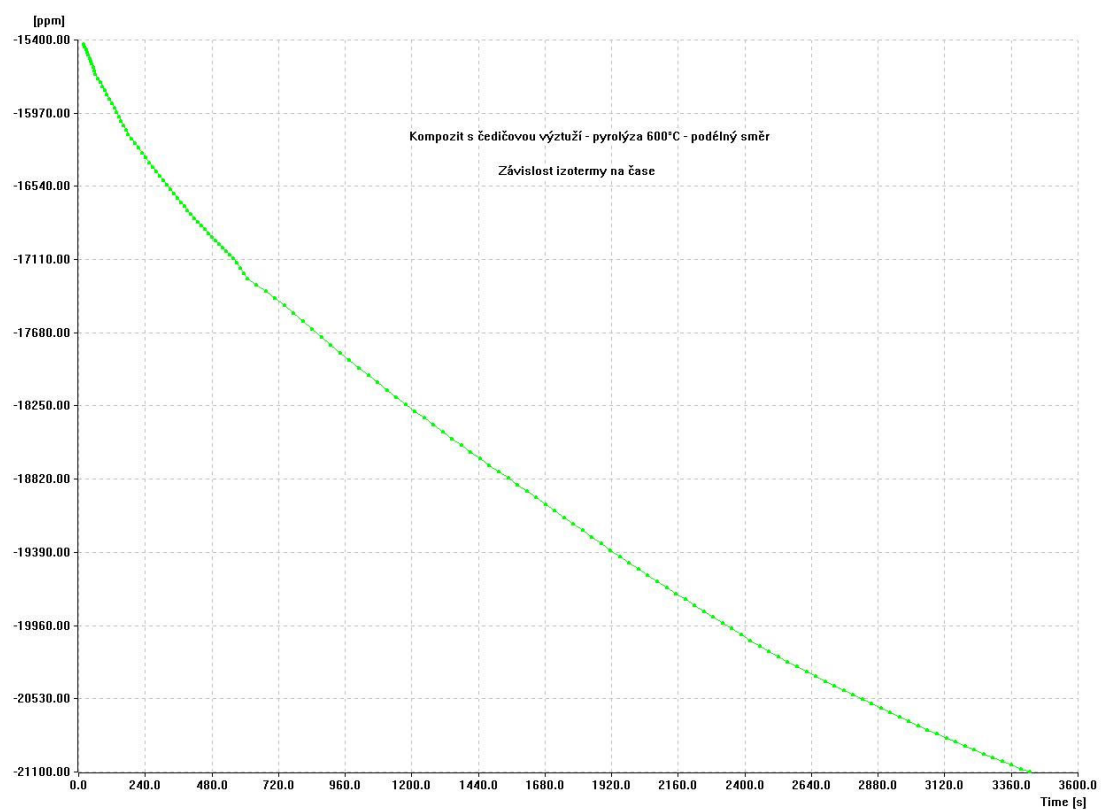
Graf. 21 Lineární expanzní koef. z první křivky ohřevu - pyrolýza 600°C podélný směr



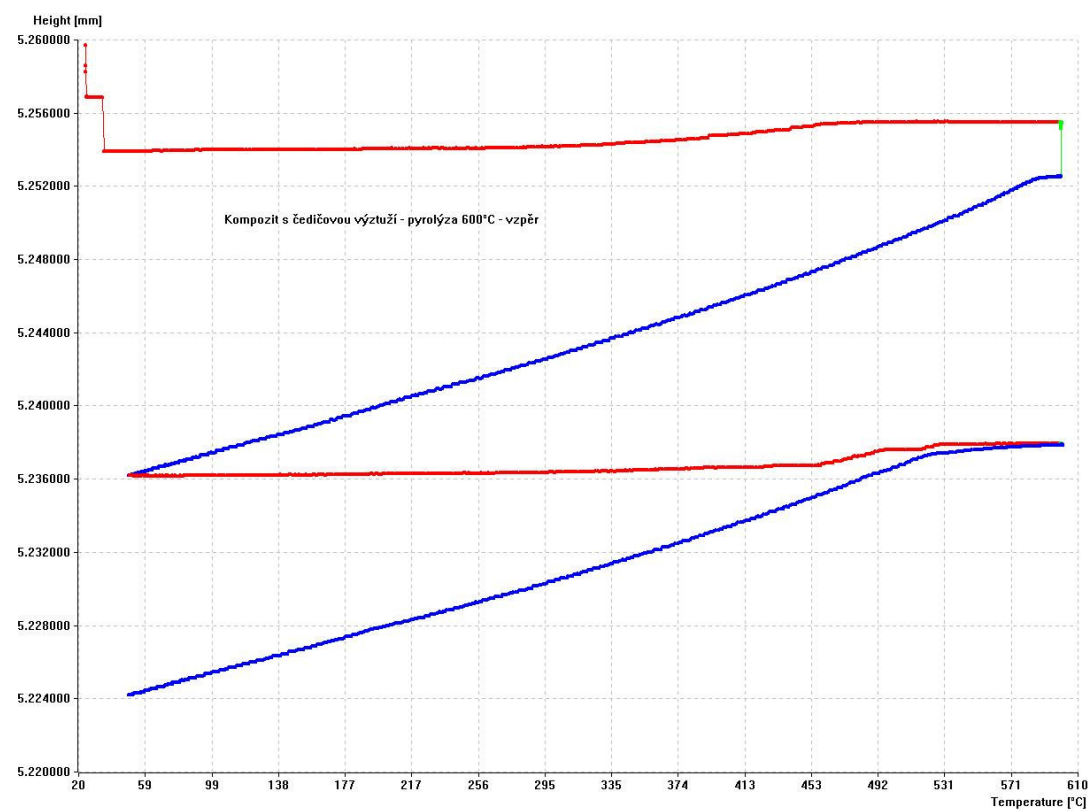
Graf. 22 Teplota změknutí matrice z první křivky ohřevu - pyrolýza 600°C podélný směr



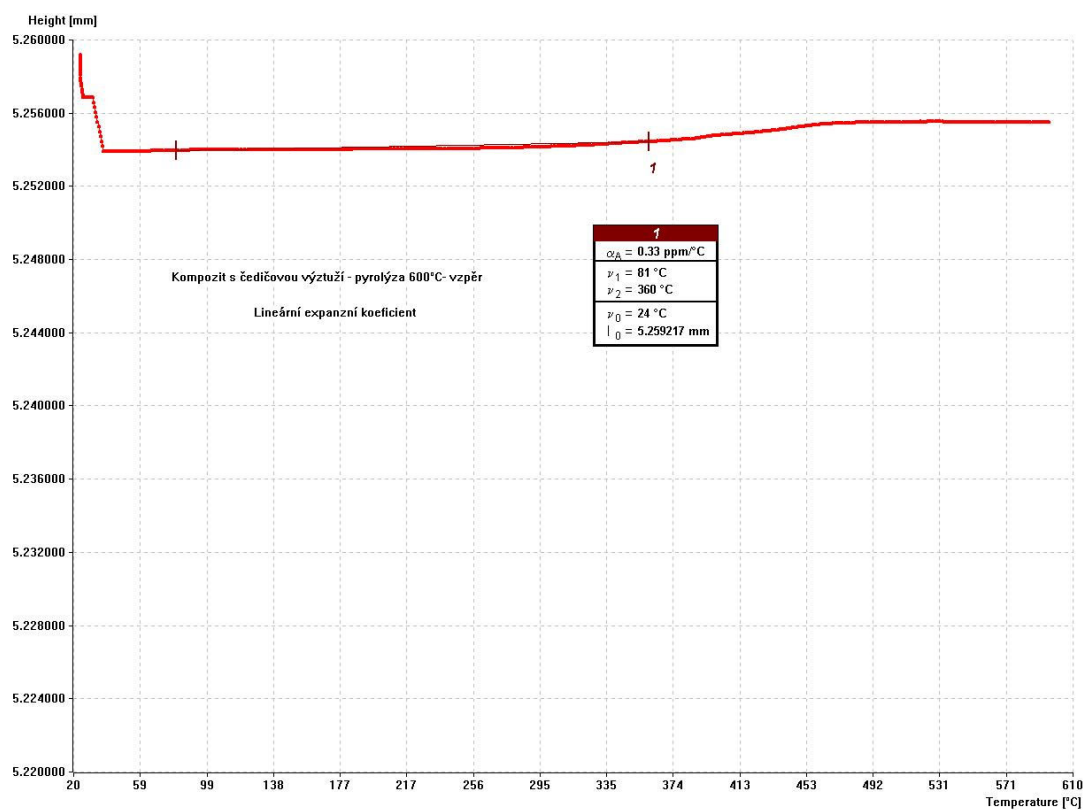
Graf. 23 Závislost izotermy na čase (časová prodleva) - pyrolýza 600°C podélný směr



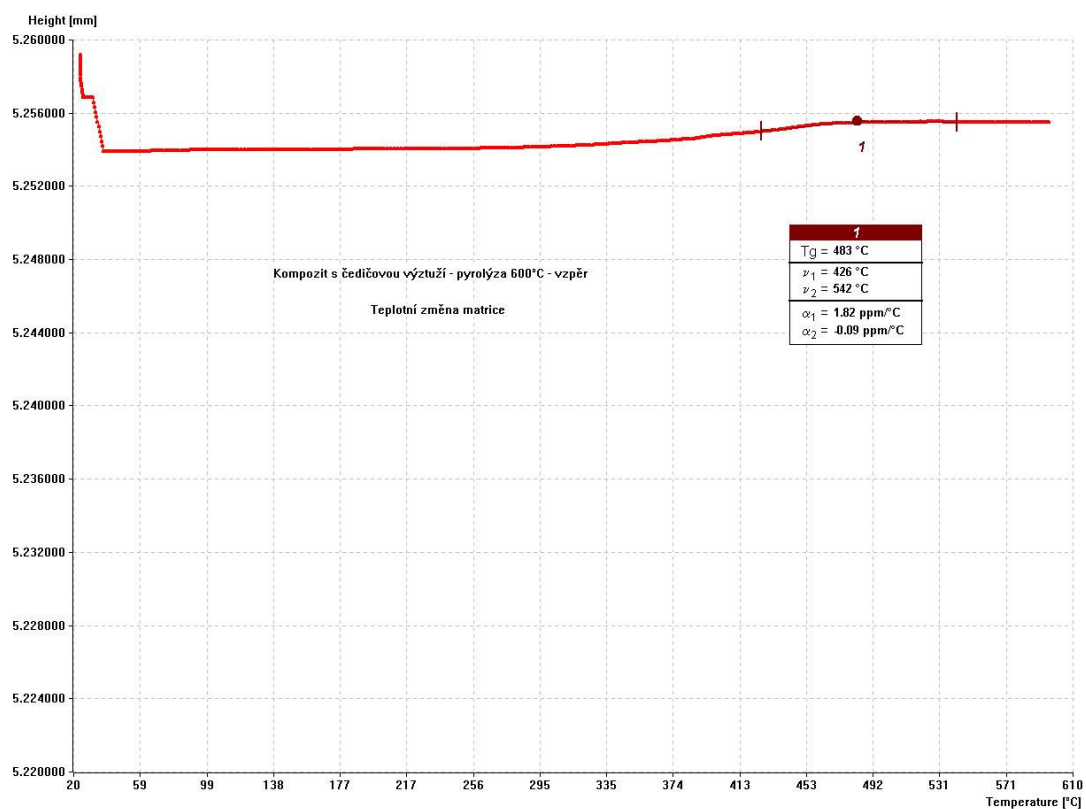
Graf. 24 Dilatační křivky - pyrolýza 600°C vzpěr



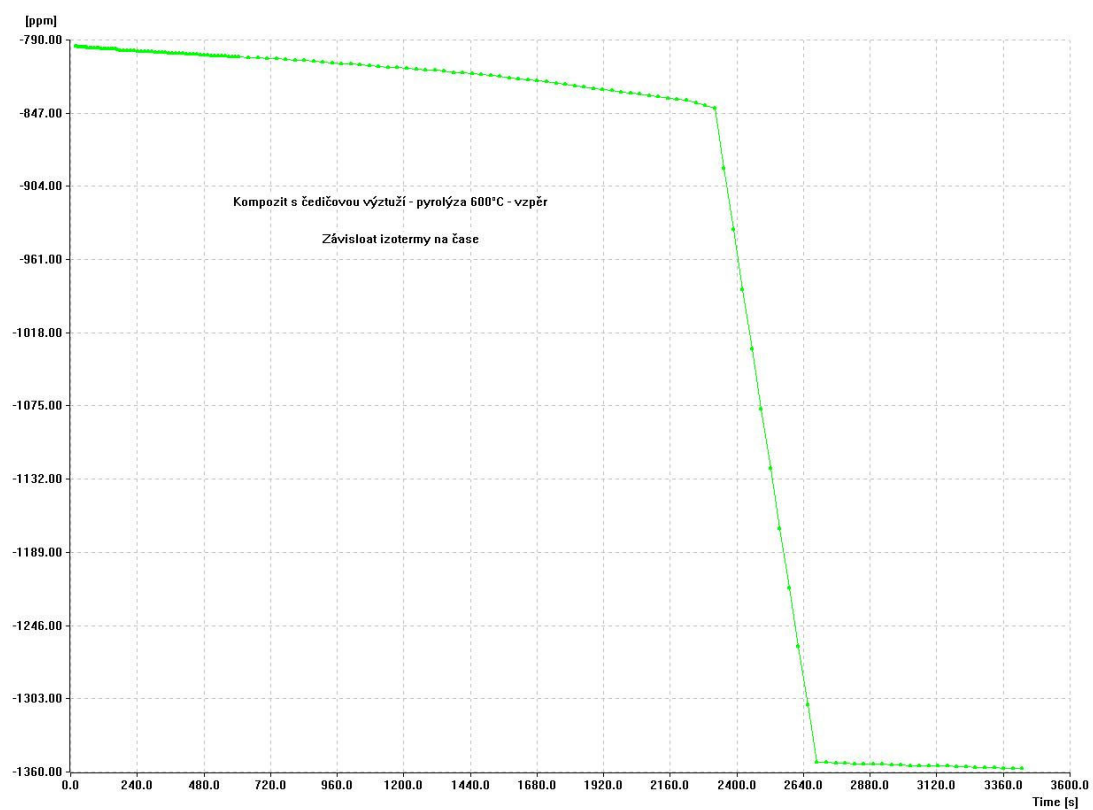
Graf. 25 Lineární expanzní koeficient z první křivky ohřevu – pyrolýza 600°C vzpěr



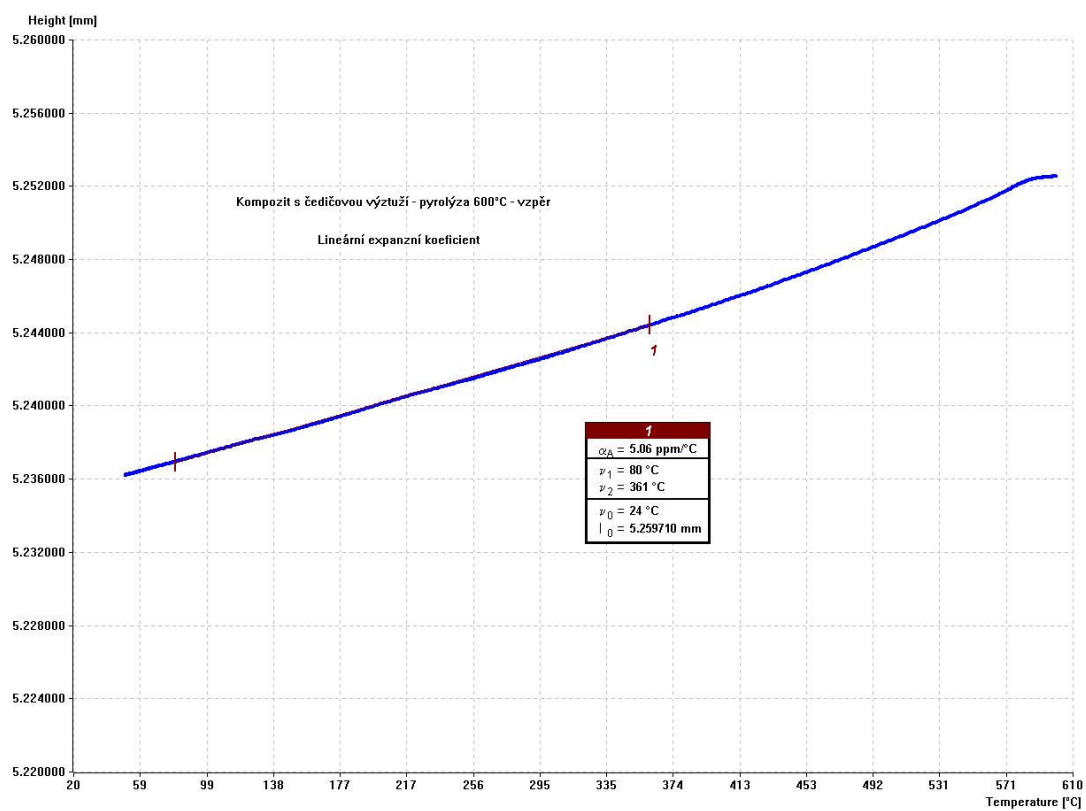
Graf. 26 Teplota změknutí matrice z první křivky ohřevu – pyrolýza 600°C vzpěr



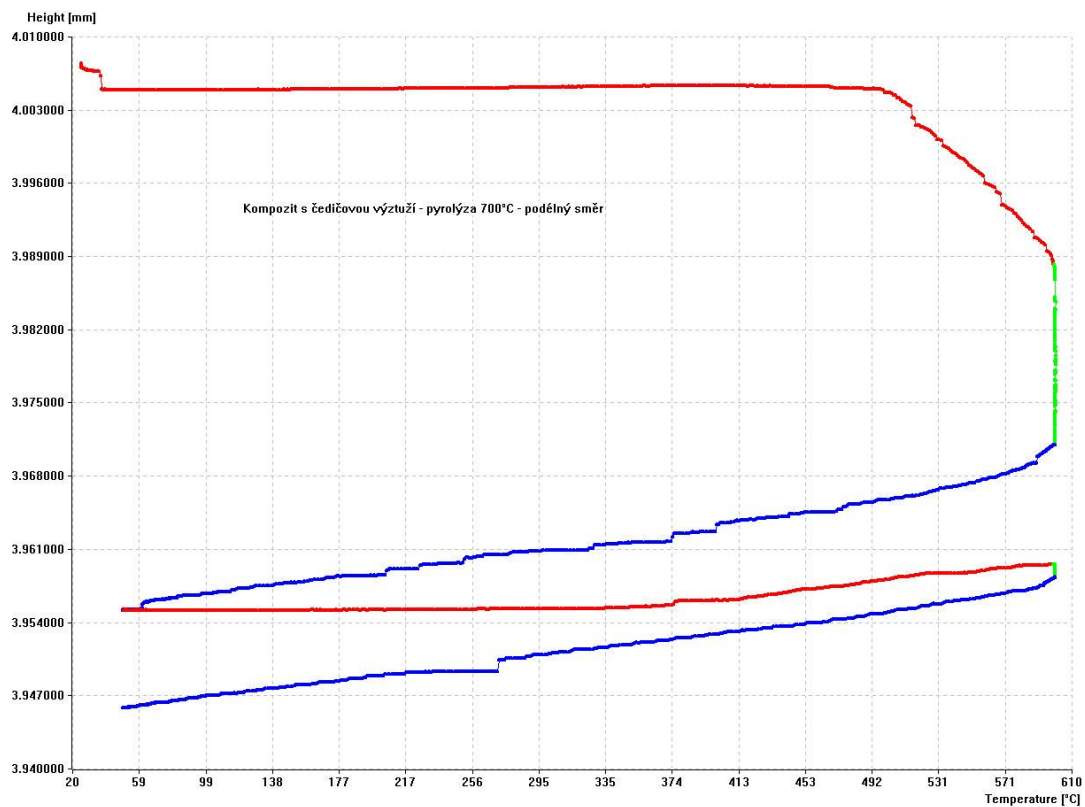
Graf. 27 Závislost izotermy na čase (časová prodleva) – pyrolýza 600°C vzpěr



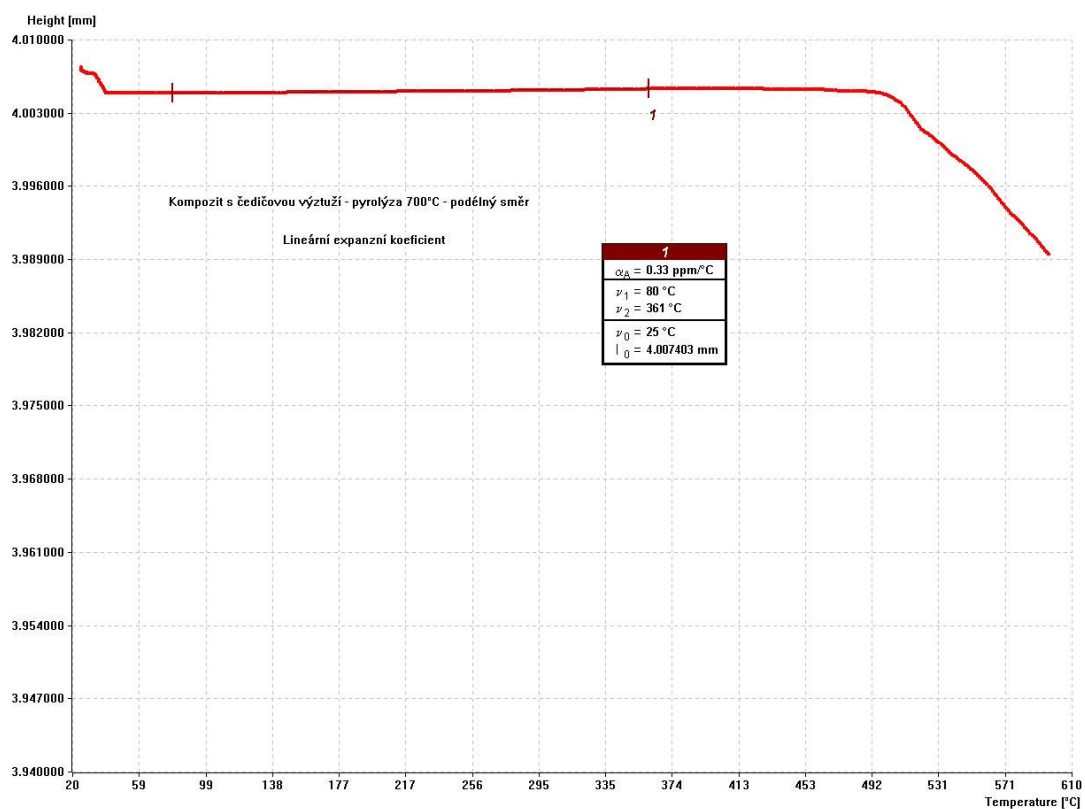
Graf. 28 Lineární expanzní koeficient z třetí křivky chlazení – pyrolýza 600°C vzpěr



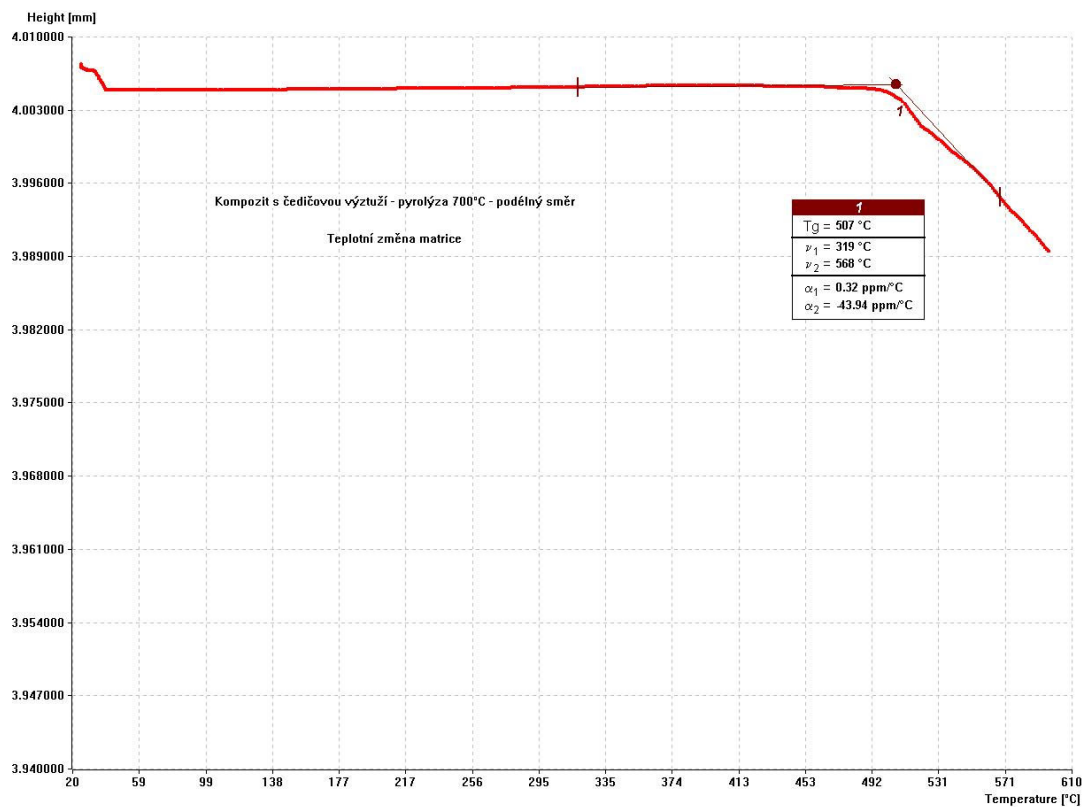
Graf. 29 Dilatační křivky - pyrolýza 700°C podélného směru



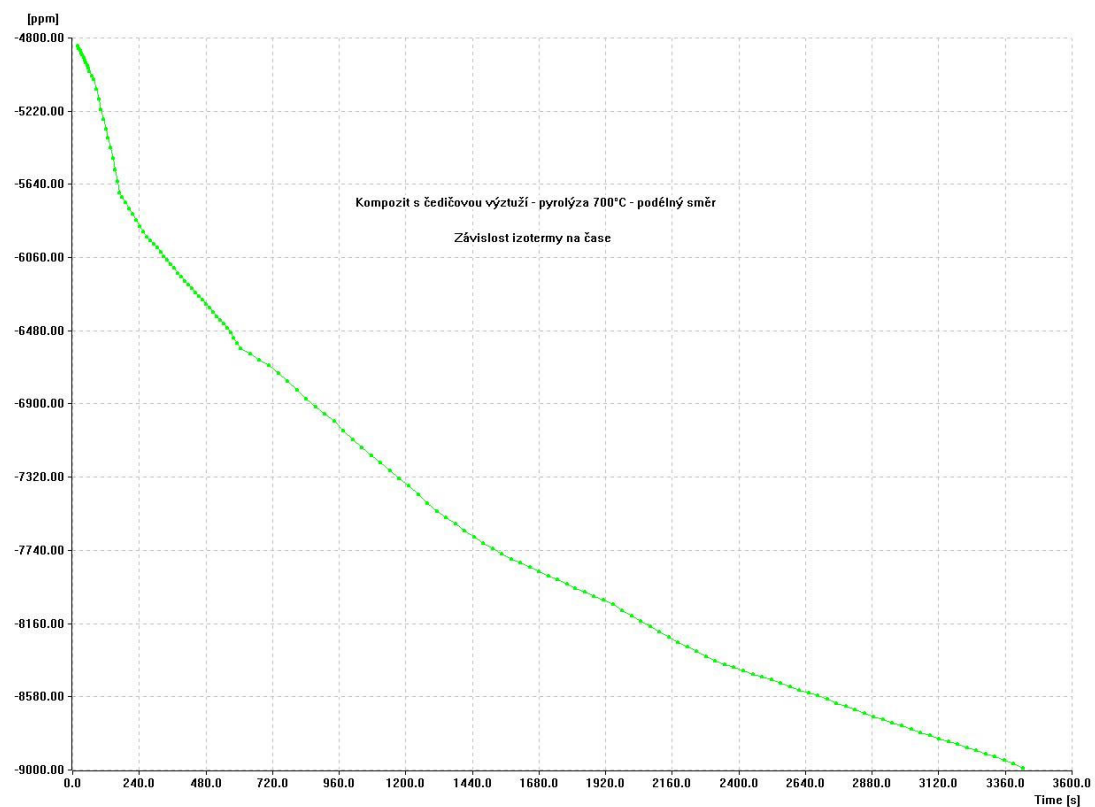
Graf. 30 Lineární expanzní koef. z první křivky ohřevu – pyrolýza 700°C podélný směr



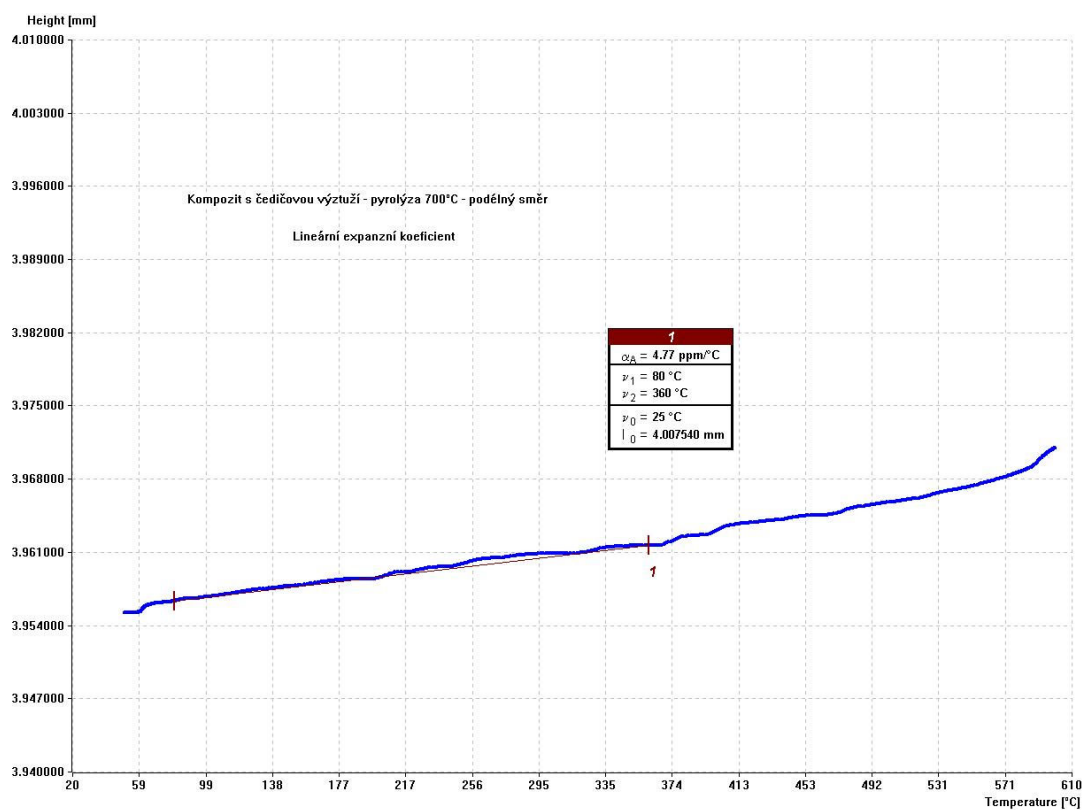
Graf. 31 Teplota změknutí matrice z první křivky ohřevu – 700°C podélný směr



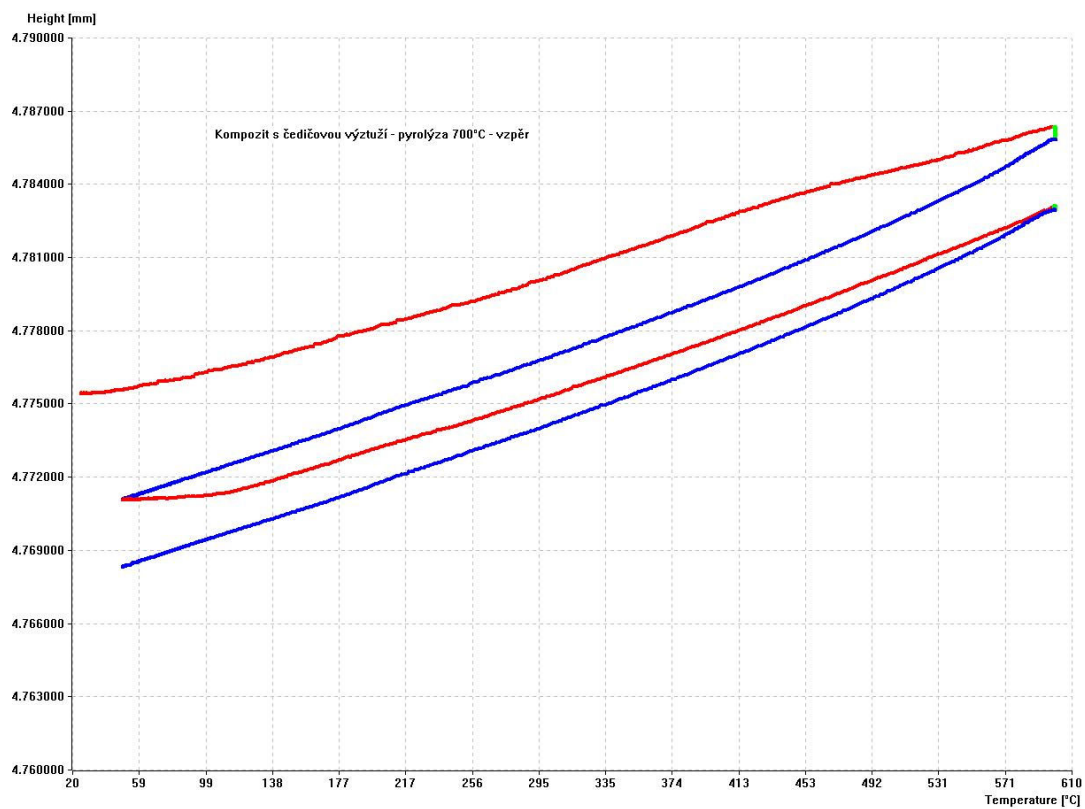
Graf. 32 Závislost izotermny na čase (časová prodleva) – pyrolýza 700°C podélný směr



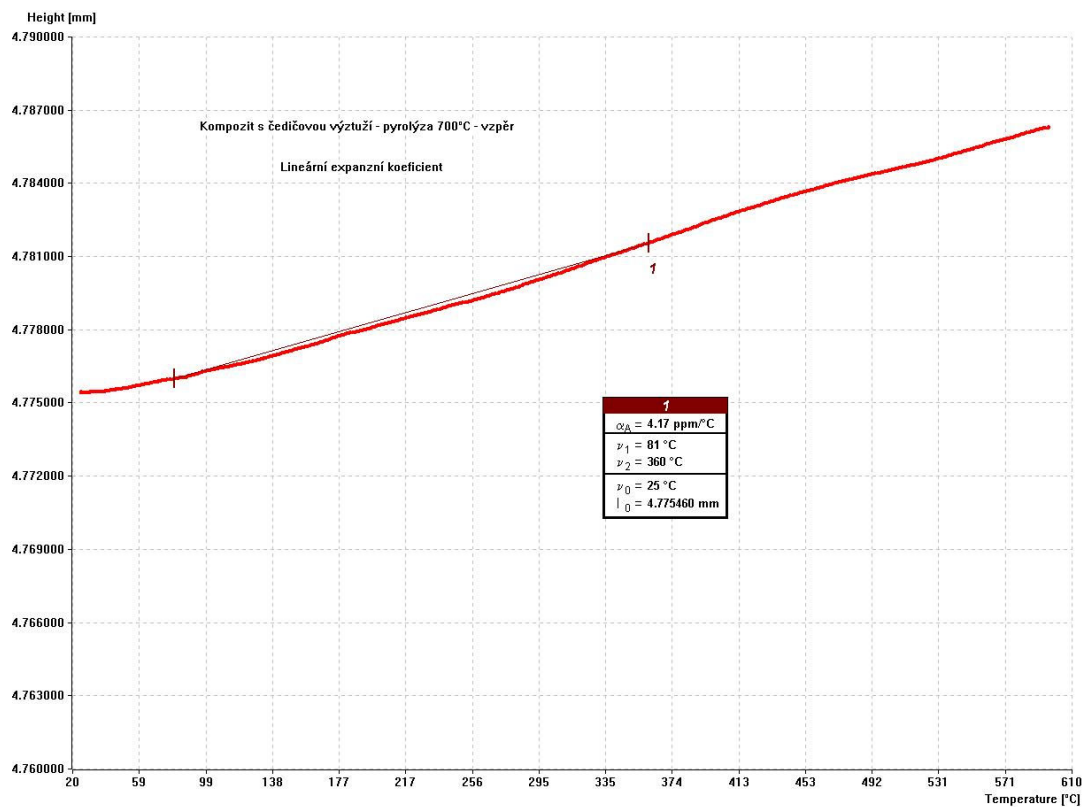
Graf. 33 Lineární expanzní koef. z třetí křivky chlazení – pyrolýza 700°C podélný směr



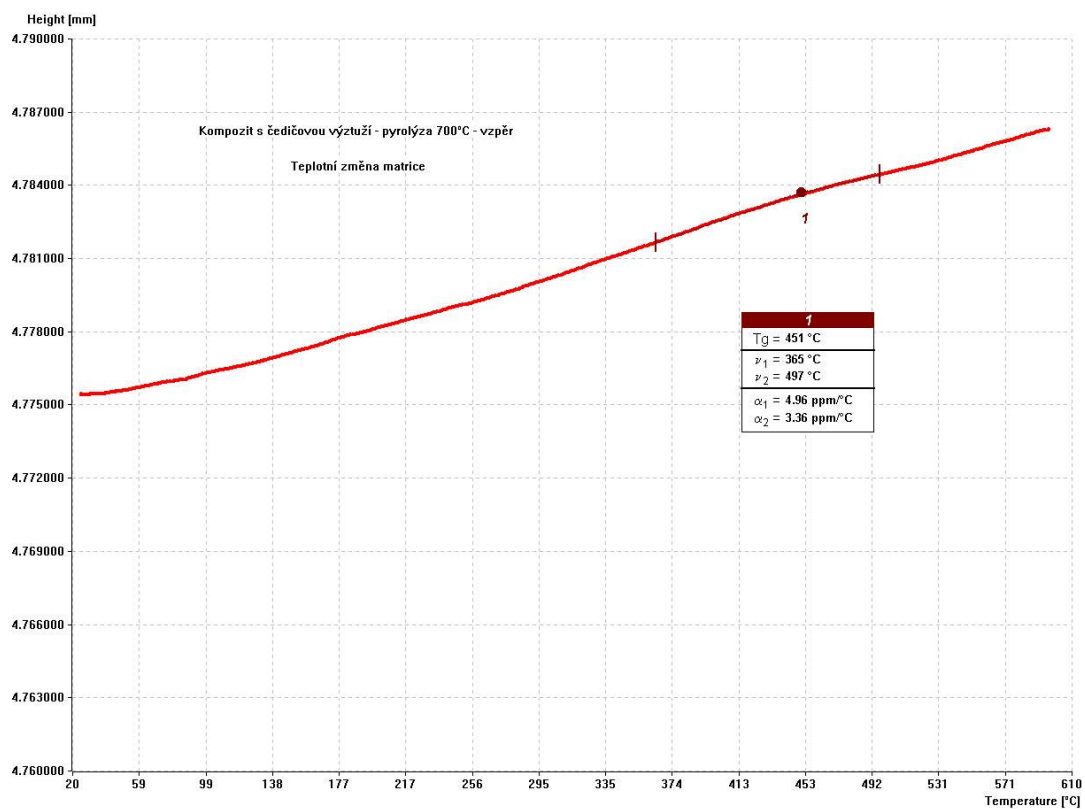
Graf. 34 Dilatační křivky - pyrolýza 700°C vzpěr



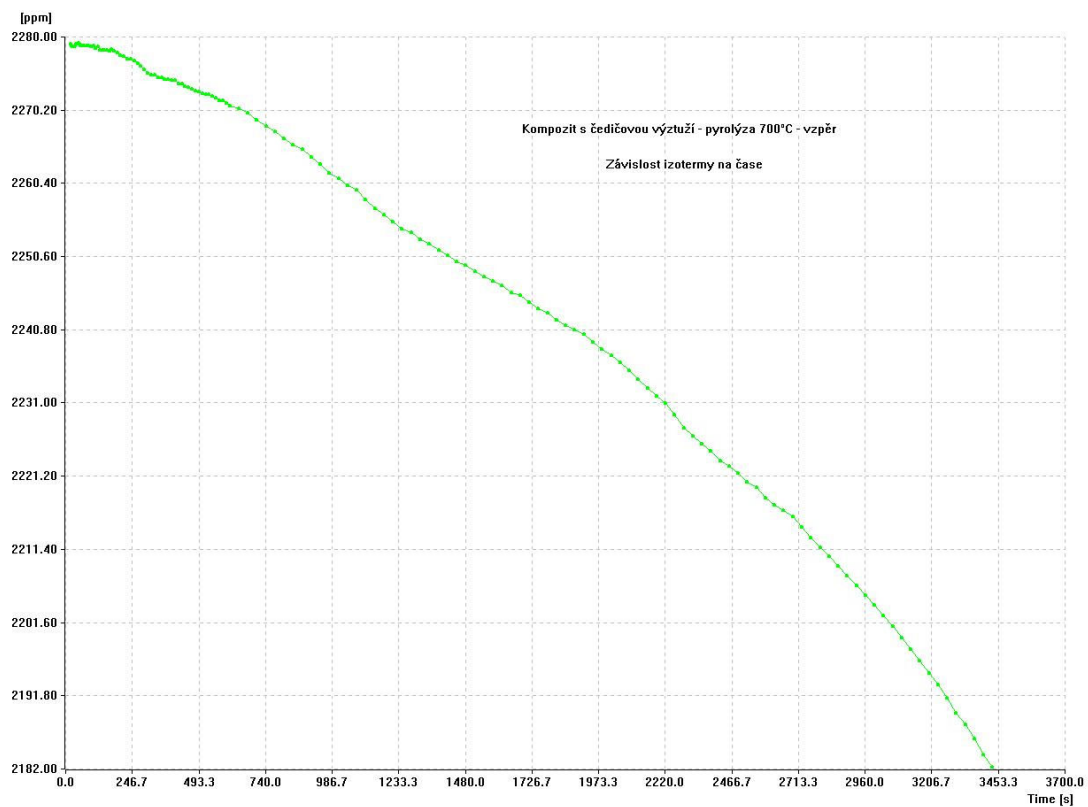
Graf. 35 Lineární expanzní koeficient z první křivky ohřevu – pyrolýza 700°C vzpěr



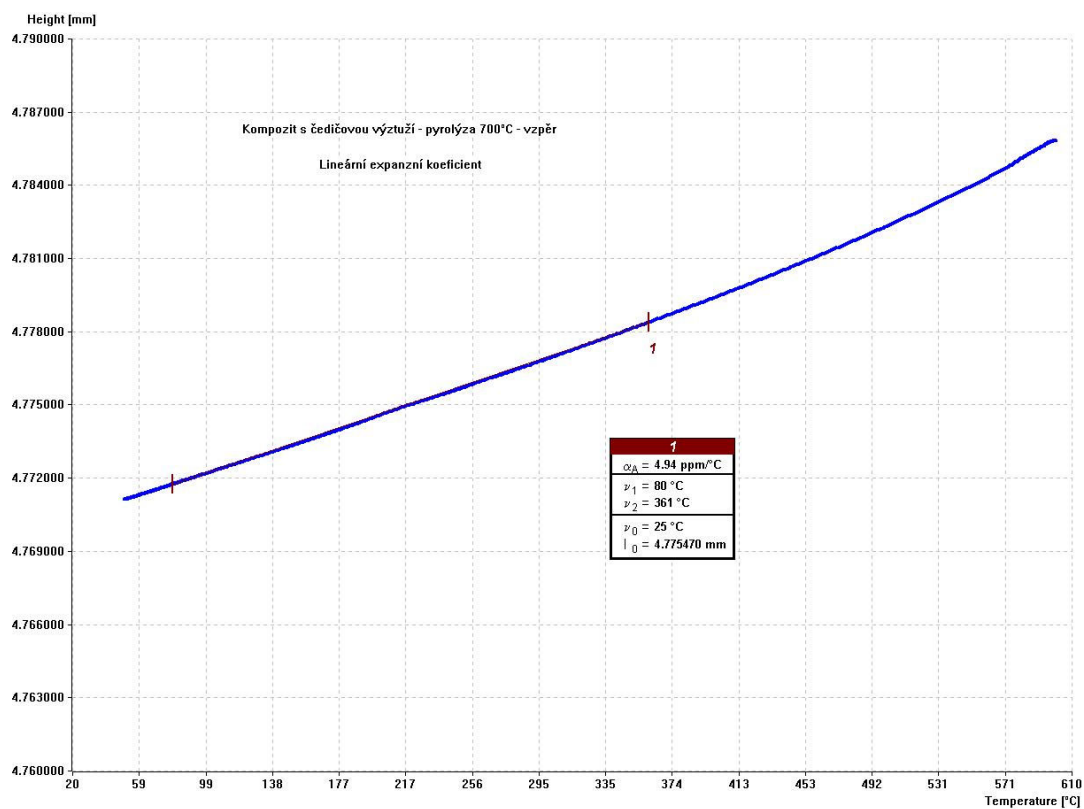
Graf.36 Teplota změknutí matrice z první křivky ohřevu – pyrolýza 700°C vzpěr



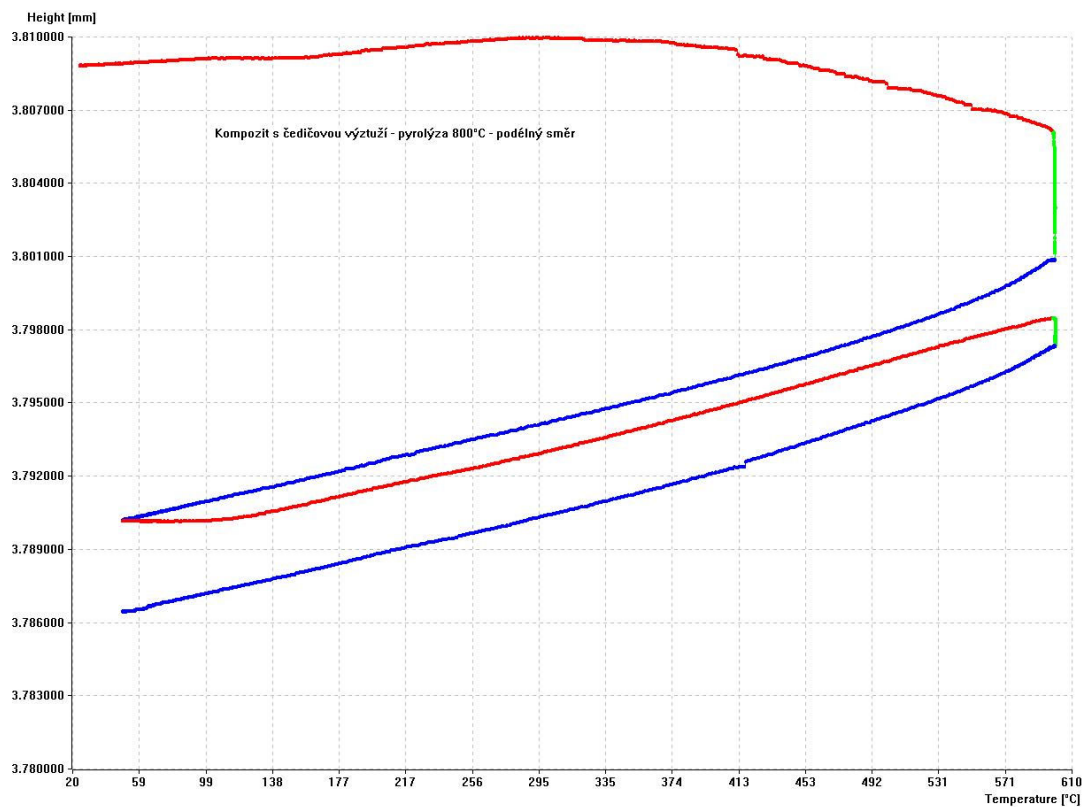
Graf. 37 Závislost izotermie na čase (časová prodleva) – pyrolýzy 700°C vzpěr



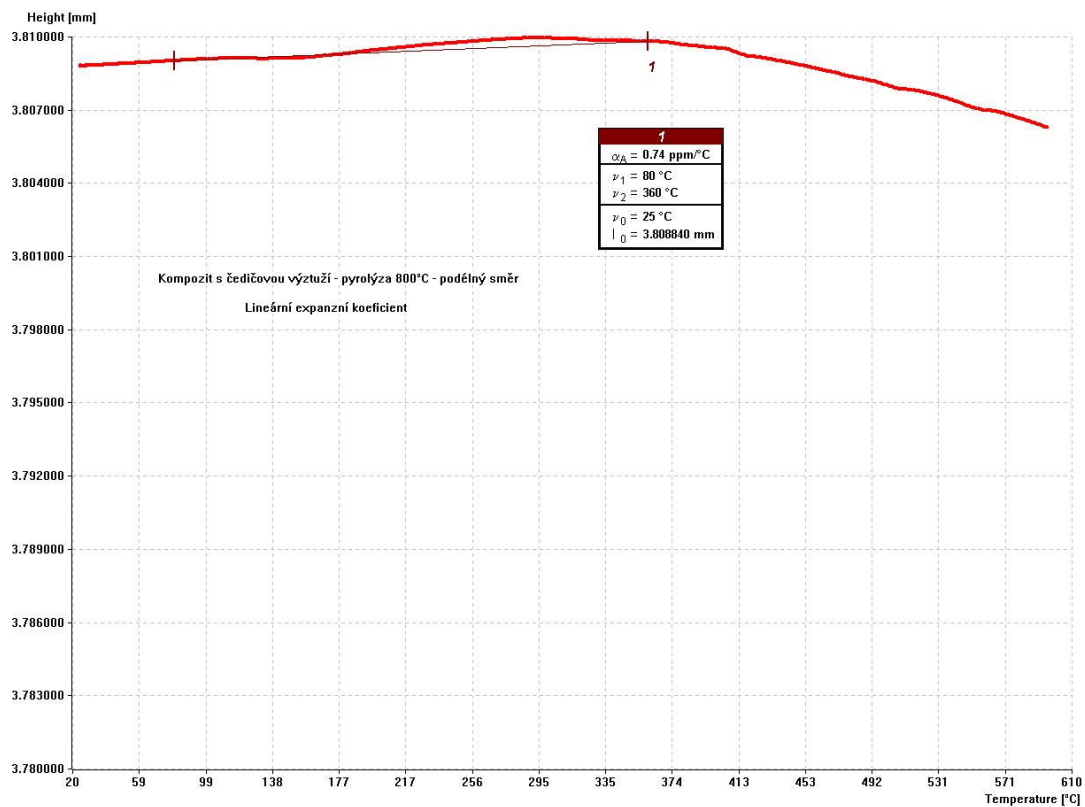
Graf. 38 Lineární expanzní koeficient z třetí křivky chlazení – pyrolýza 700°C vzpěr



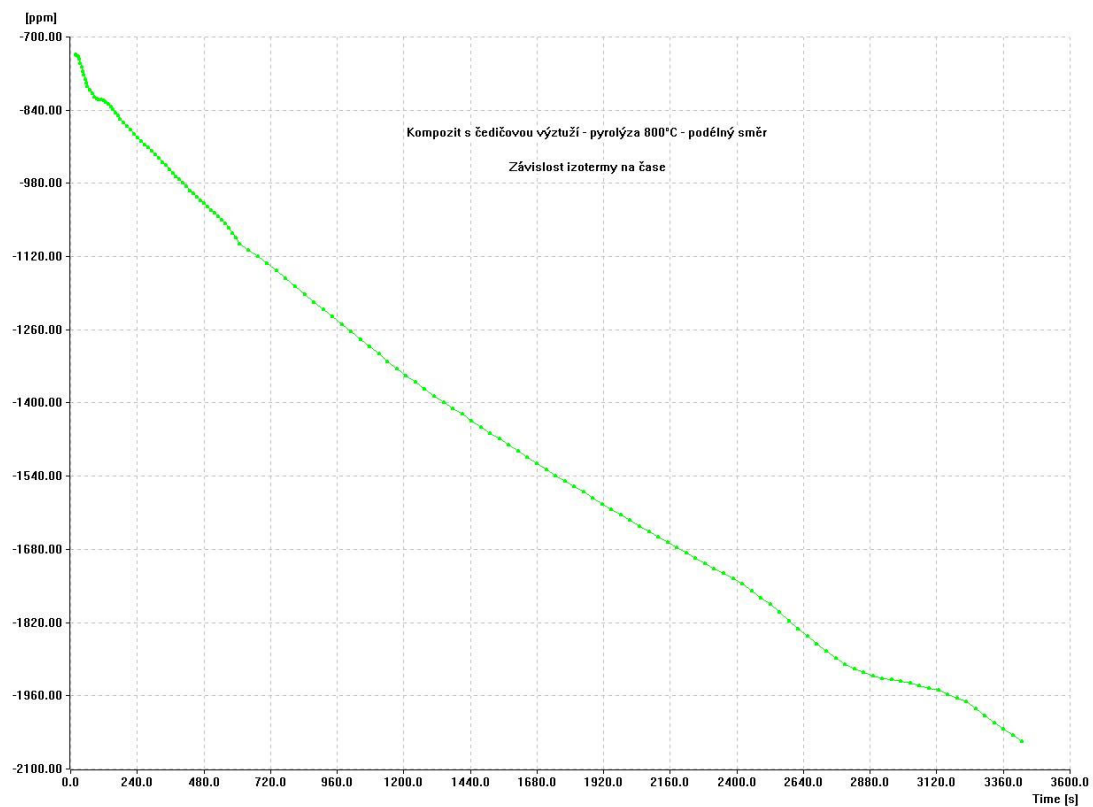
Graf. 39 Dilatační křivky - pyrolýza 800°C podélný směr



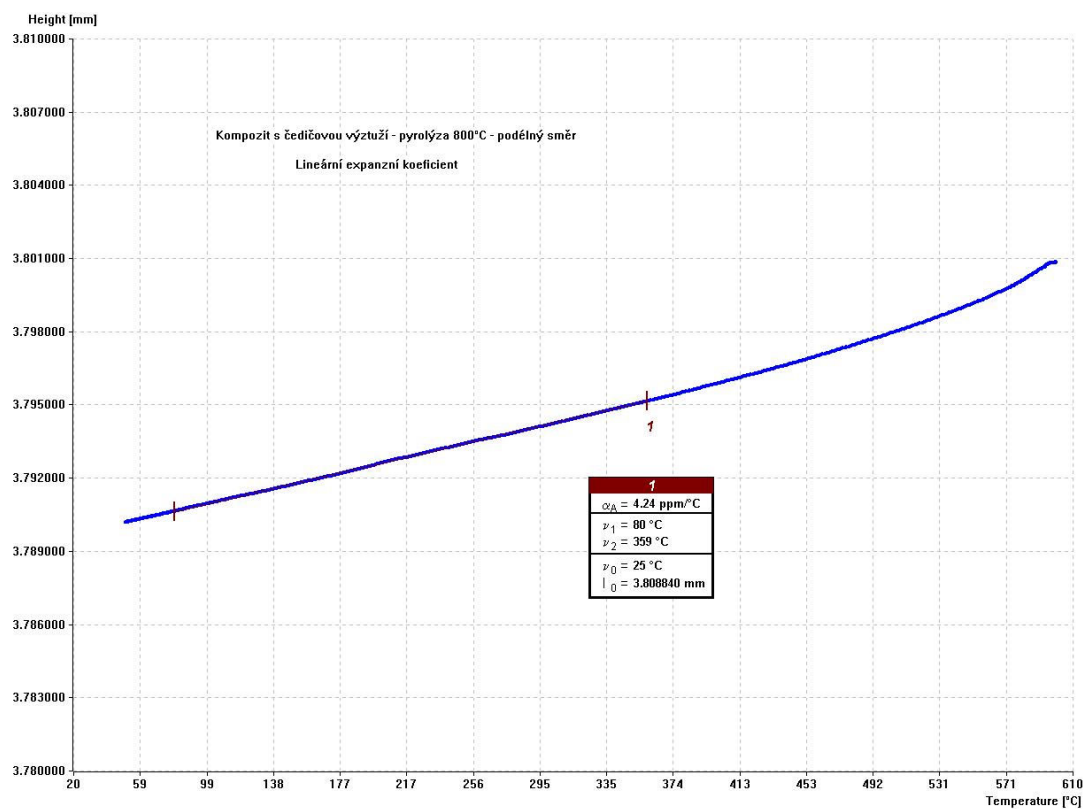
Graf. 40 Lineární expanzní koef. z první křivky ohřevu – pyrolýza 800°C podélný směr



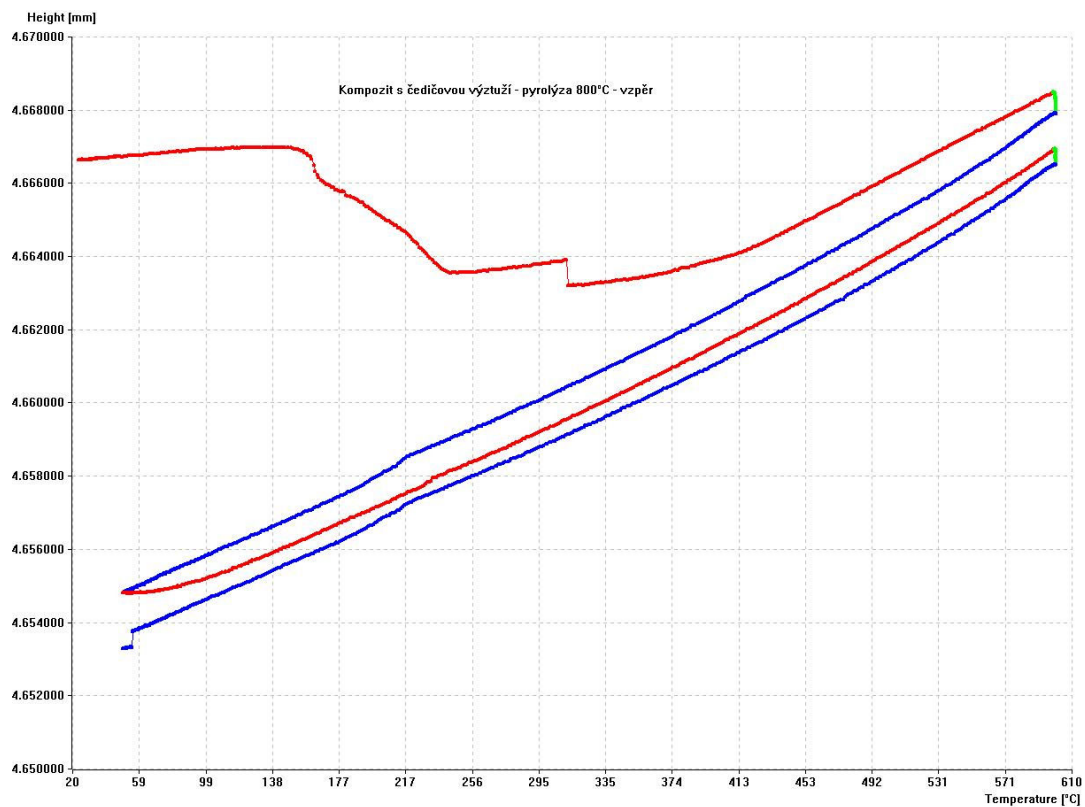
Graf. 41 Závislost izotermny na čase (časová prodleva) – pyrolýza 800°C podélný směr



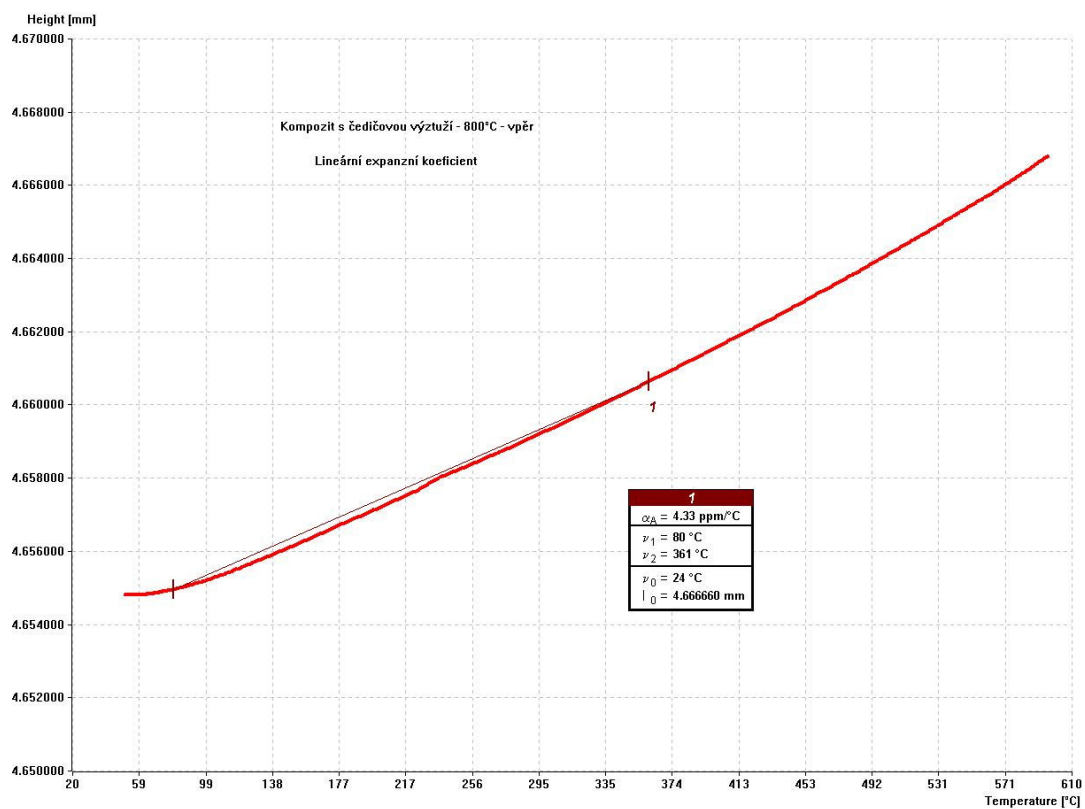
Graf. 42 Lineární expanzní koef. z třetí křivky chlazení – pyrolýza 800°C podélný směr



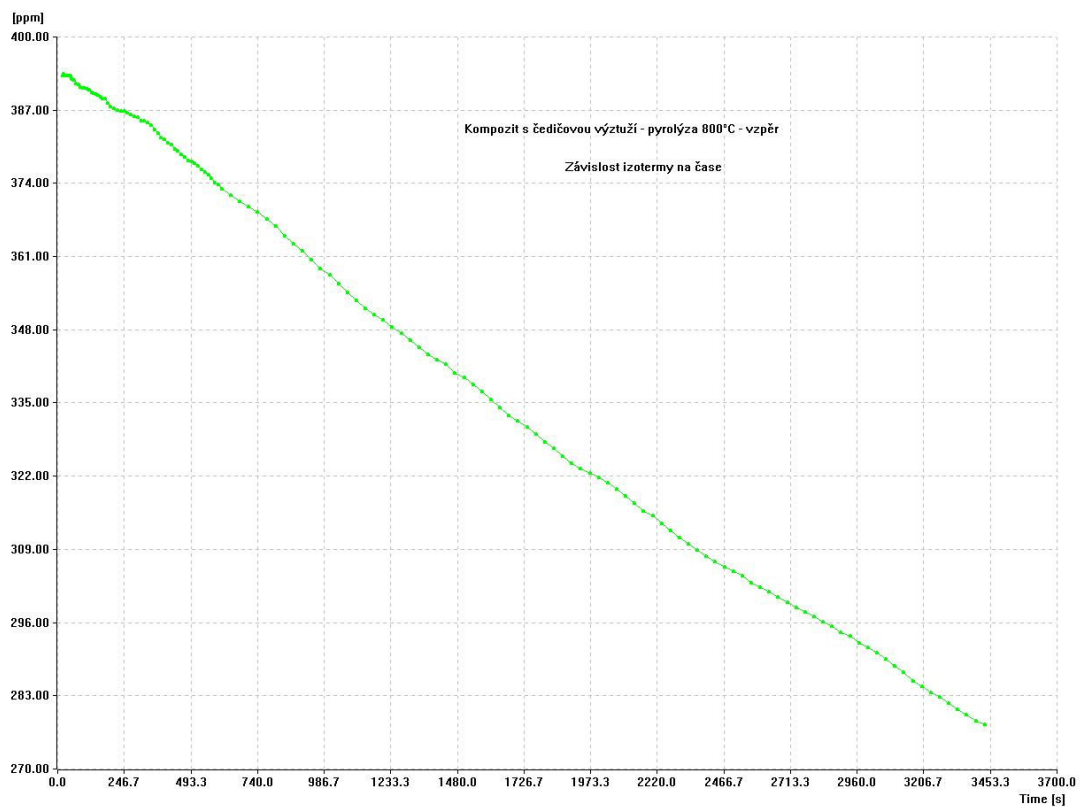
Graf. 43 Dilatační křivky – pyrolýza 800°C vzpěr



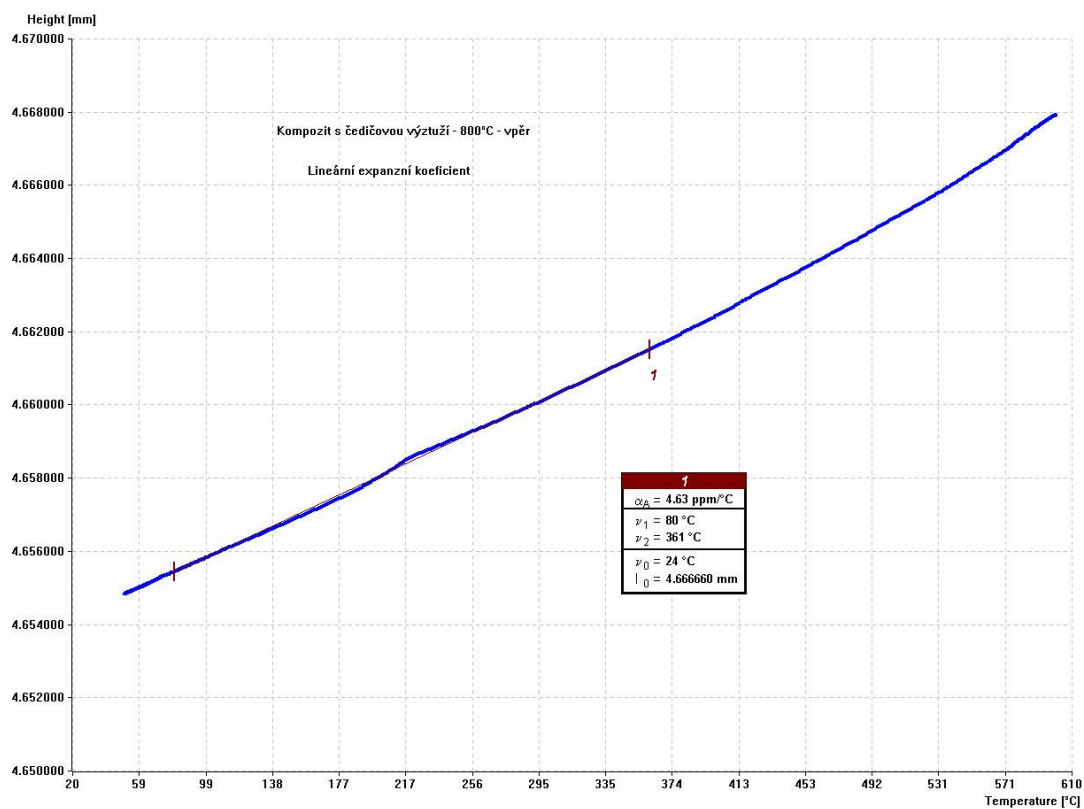
Graf. 44 Lineární expanzní koeficient z čtvrté křivky ohřevu – pyrolýza 800°C vzpěr



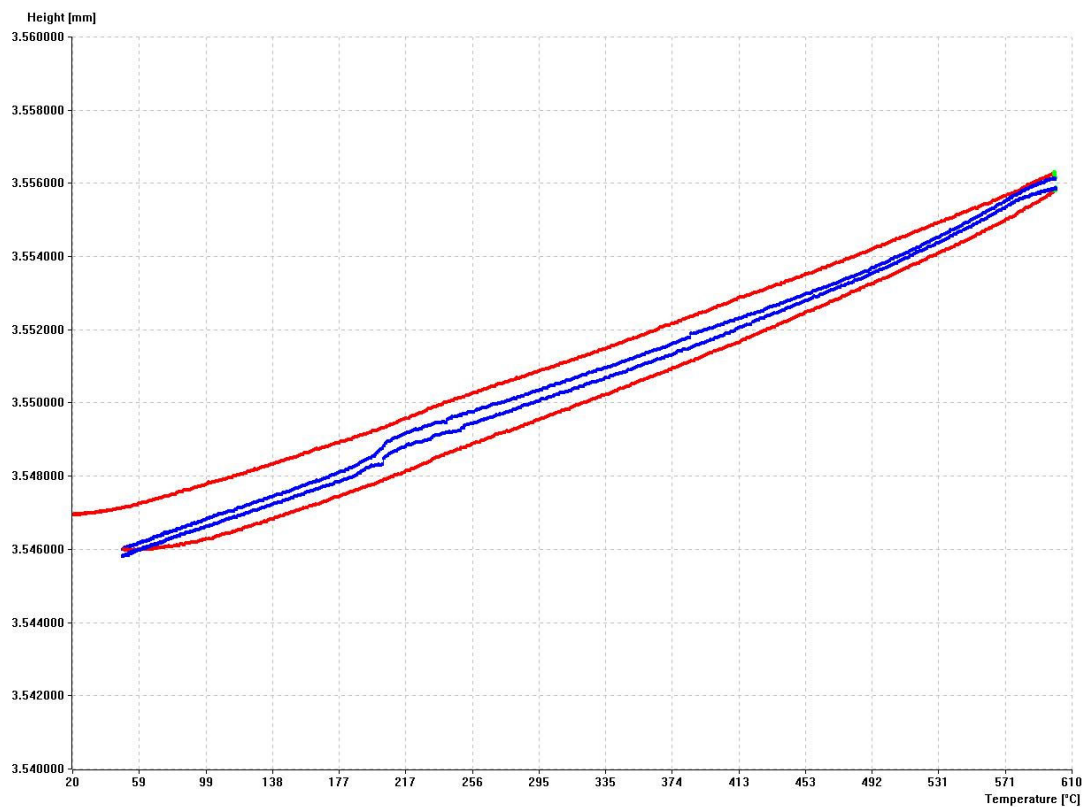
Graf. 45 Závislost izotermie na čase (časová prodleva) – pyrolýza 800°C vzpěr



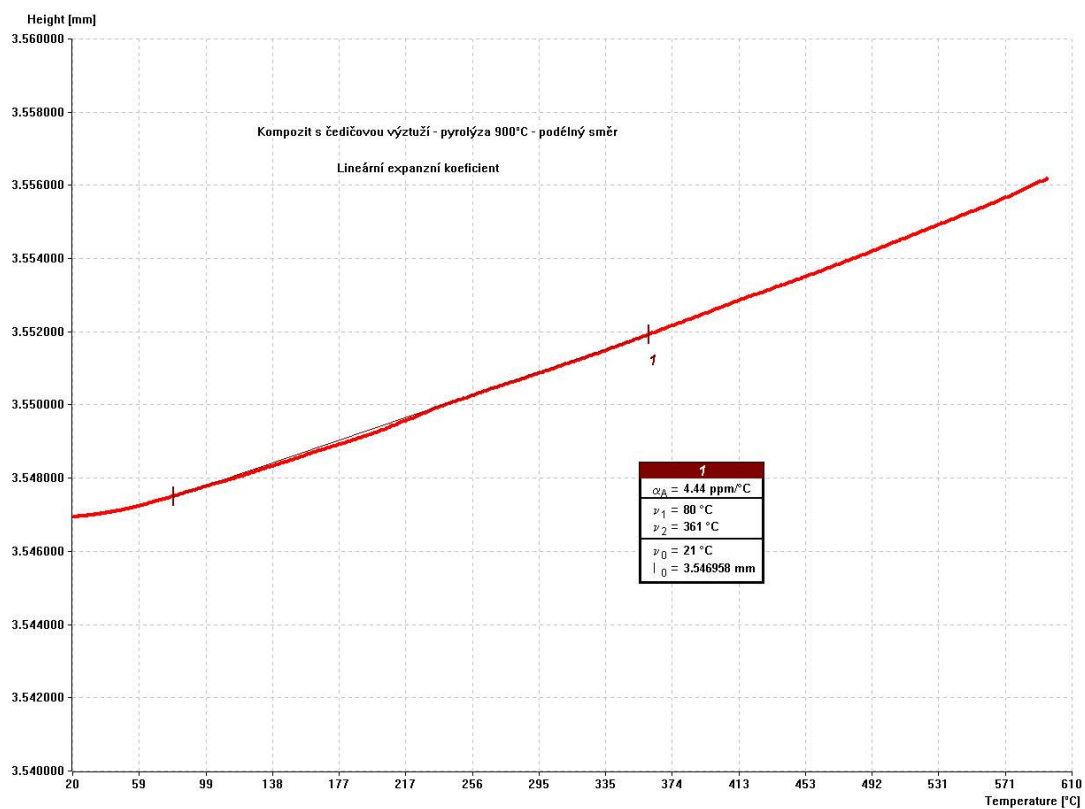
Graf. 46 Lineární expanzí koeficient z třetí křivky chlazení – pyrolýza 800°C vzpěr



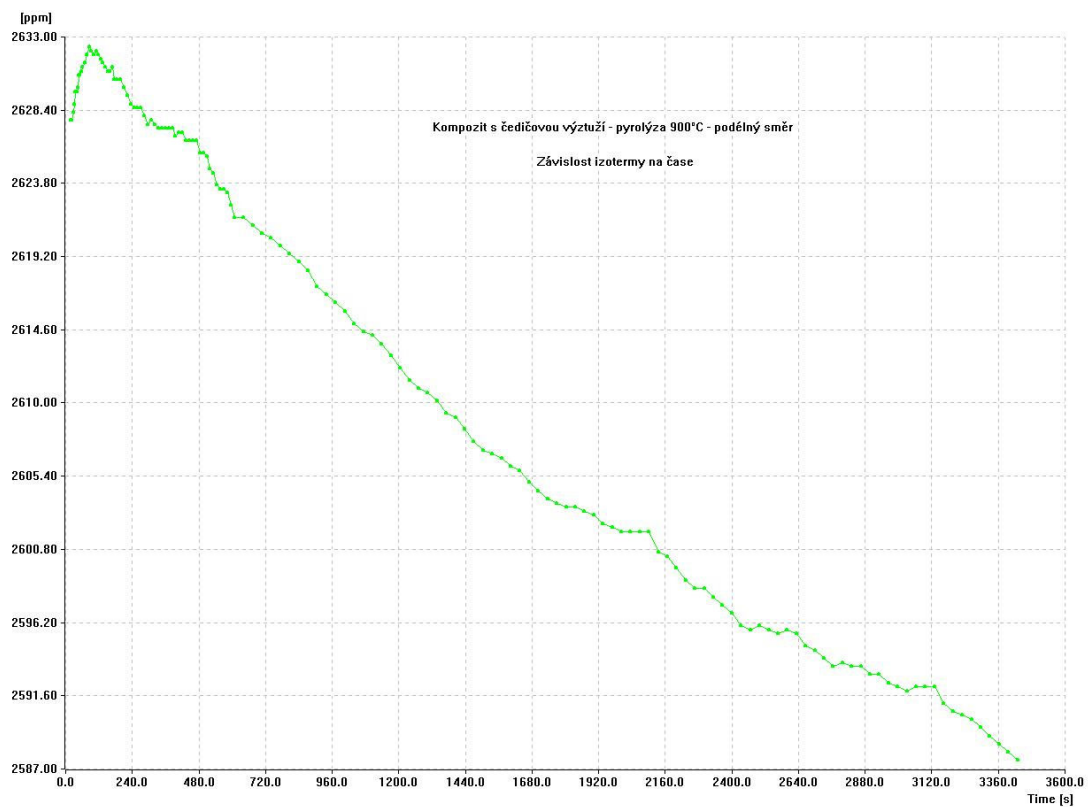
Graf. 47 Dilatační křivky – pyrolýza 900°C podélný směr



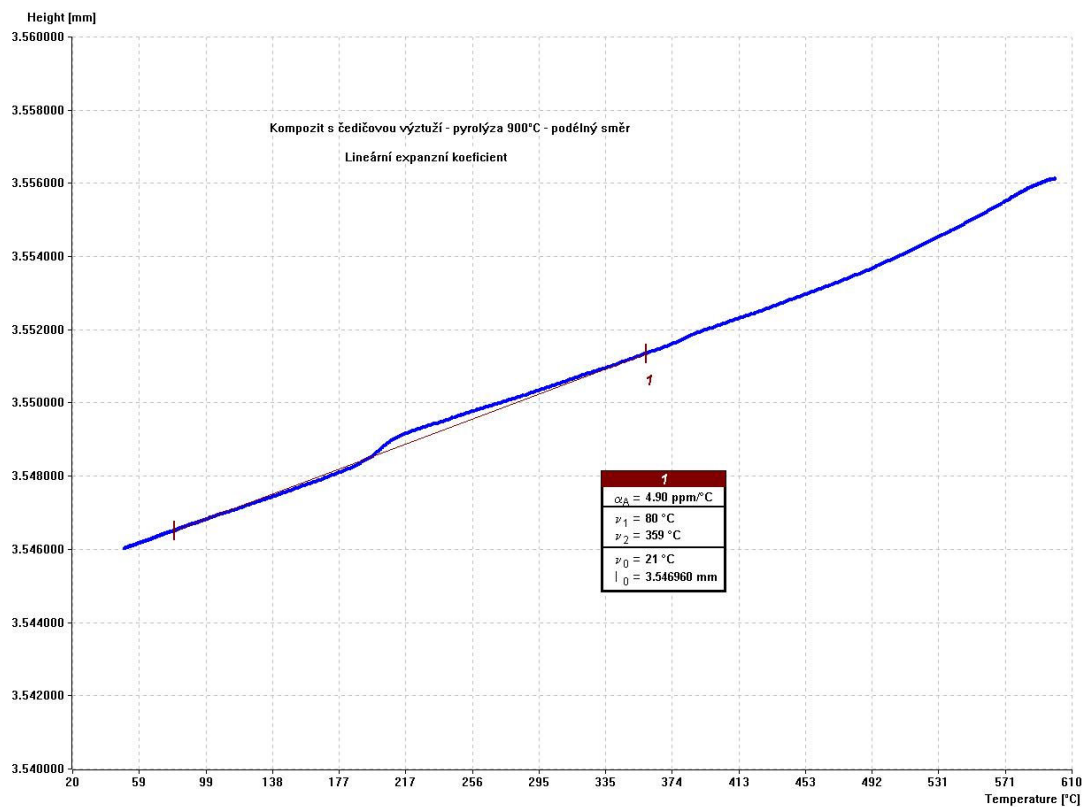
Graf. 48 Lineární expanzní koef. z první křivky ohřevu – pyrolýza 900°C podélný směr



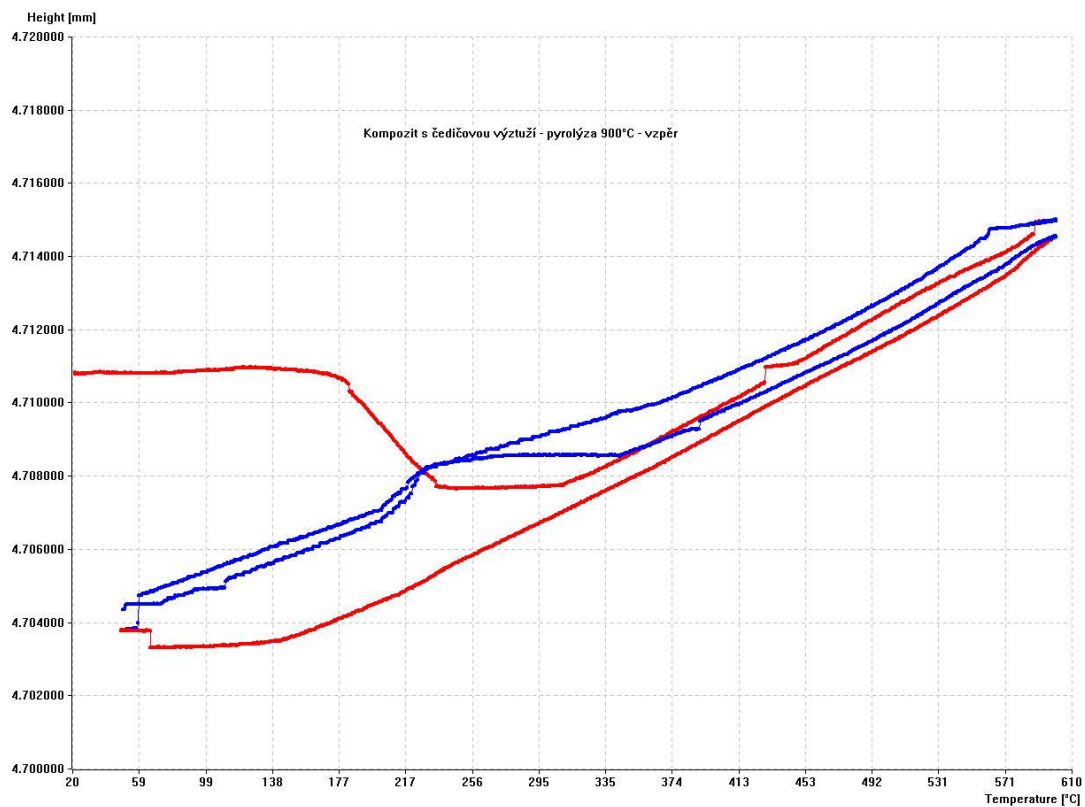
Graf. 49 Závislost izotermny na čase (časová prodleva) – pyrolýza 900°C podélný směr



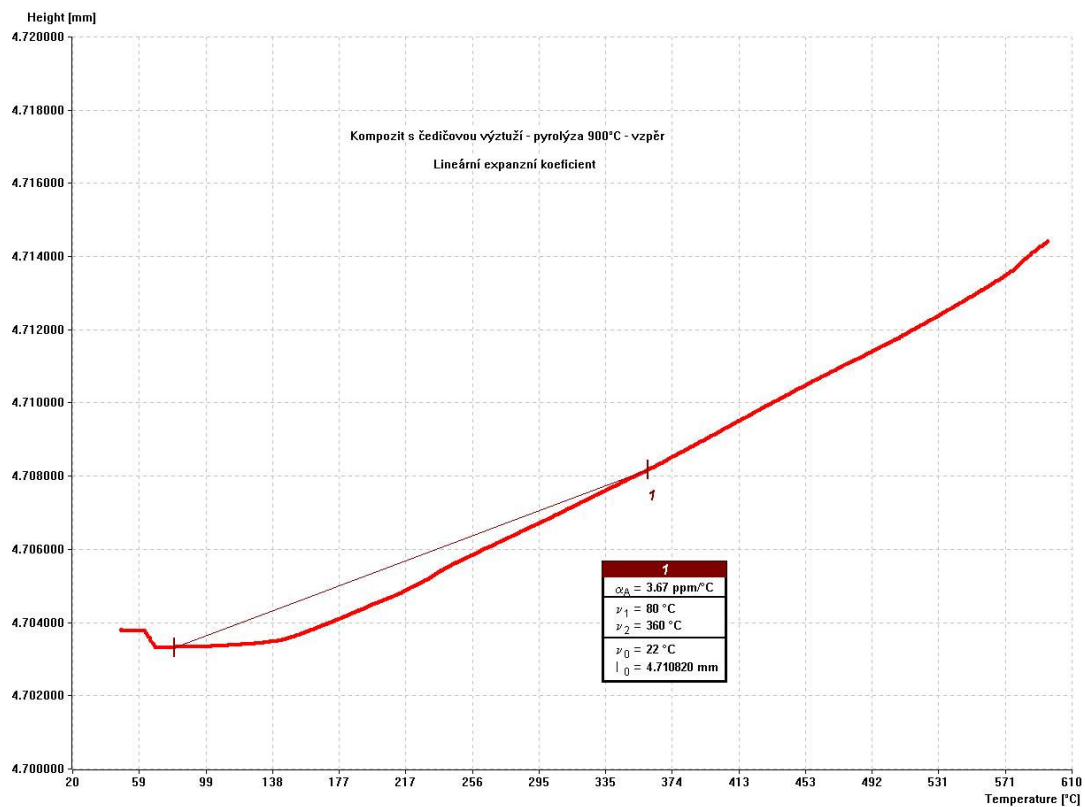
Graf. 50 Lineární expanzní koef. z třetí křivky chlazení – pyrolýza 900°C podélný směr



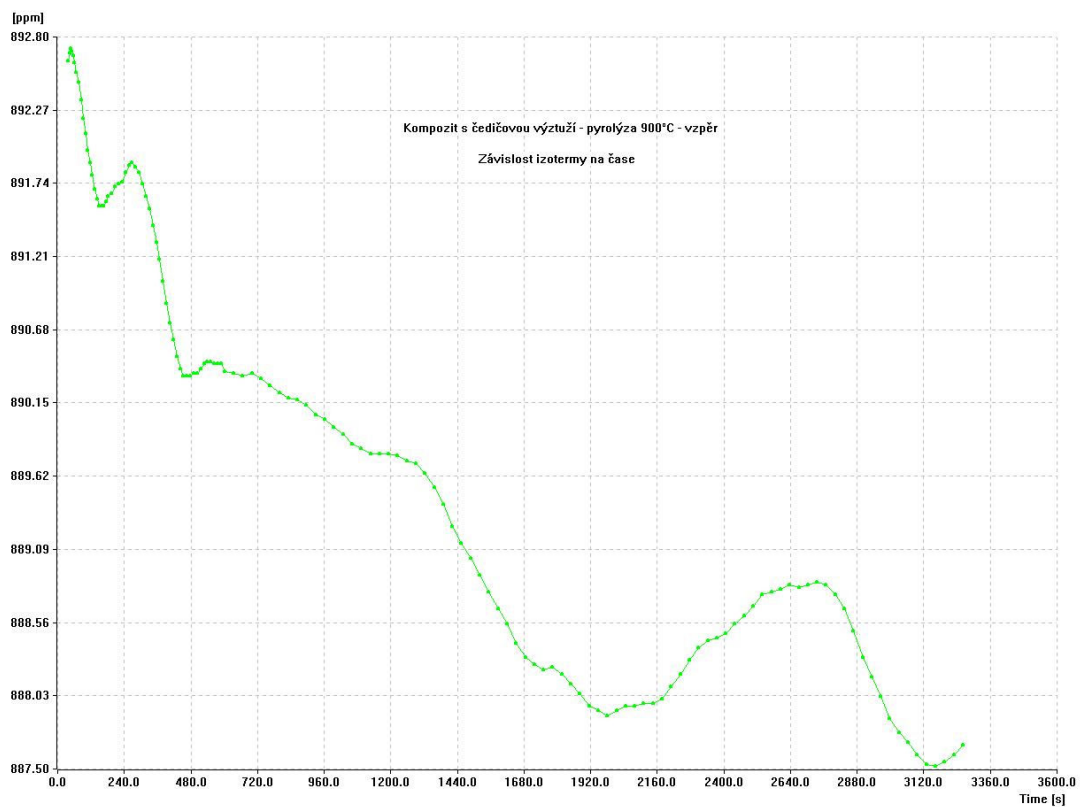
Graf. 51 Dilatační křivky – pyrolýza 900°C vzpěr



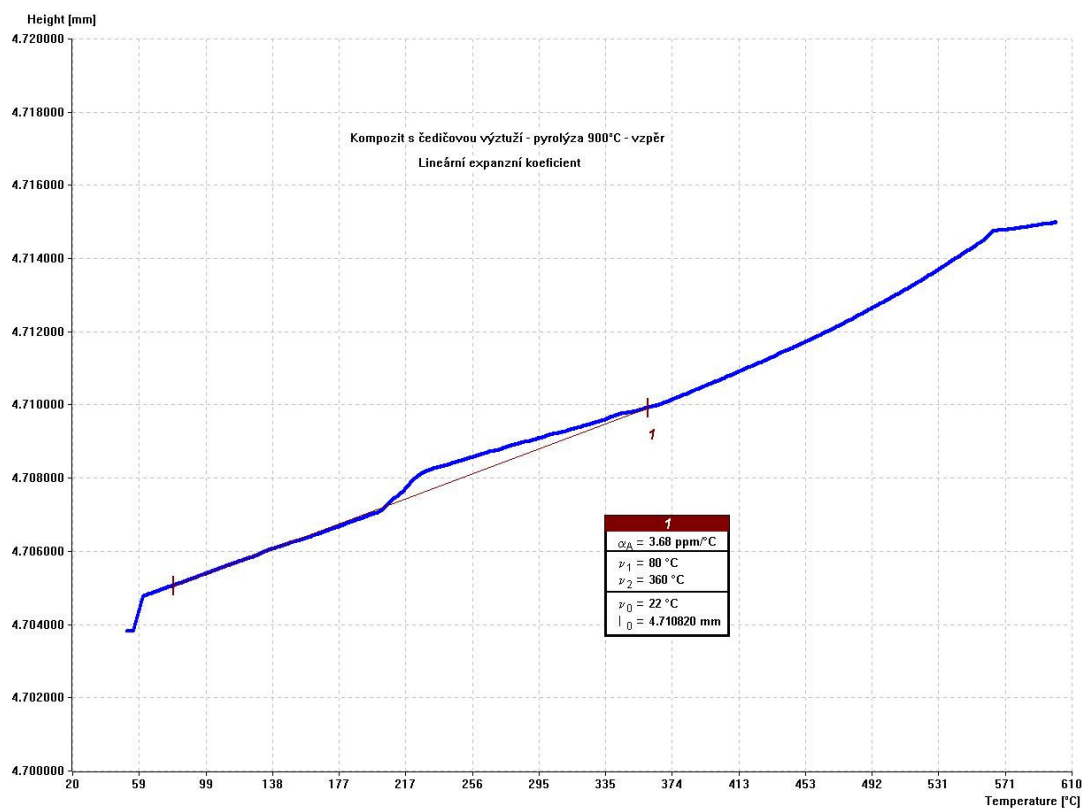
Graf. 52 Lineární expanzní koeficient z čtvrté křivky ohřevu – pyrolýza 900°C vzpěr



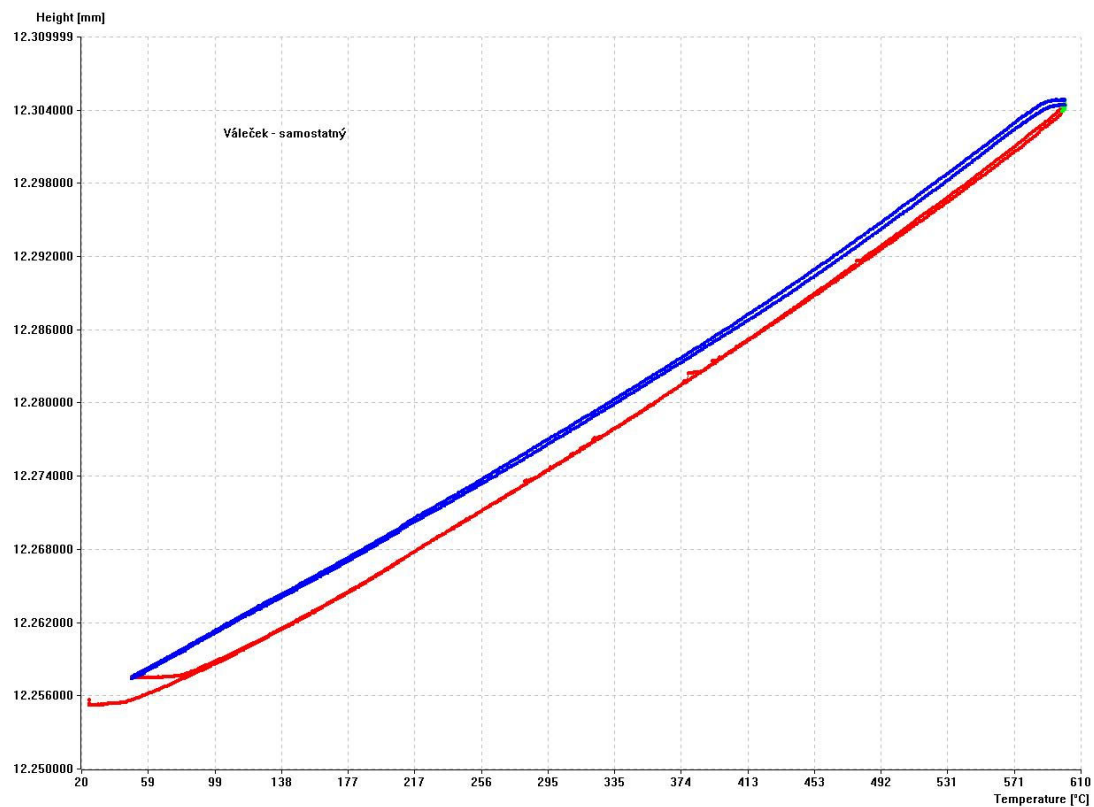
Graf. 53 Závislost izotermie na čase (časová prodleva) – pyrolýza 900°C vzpěr



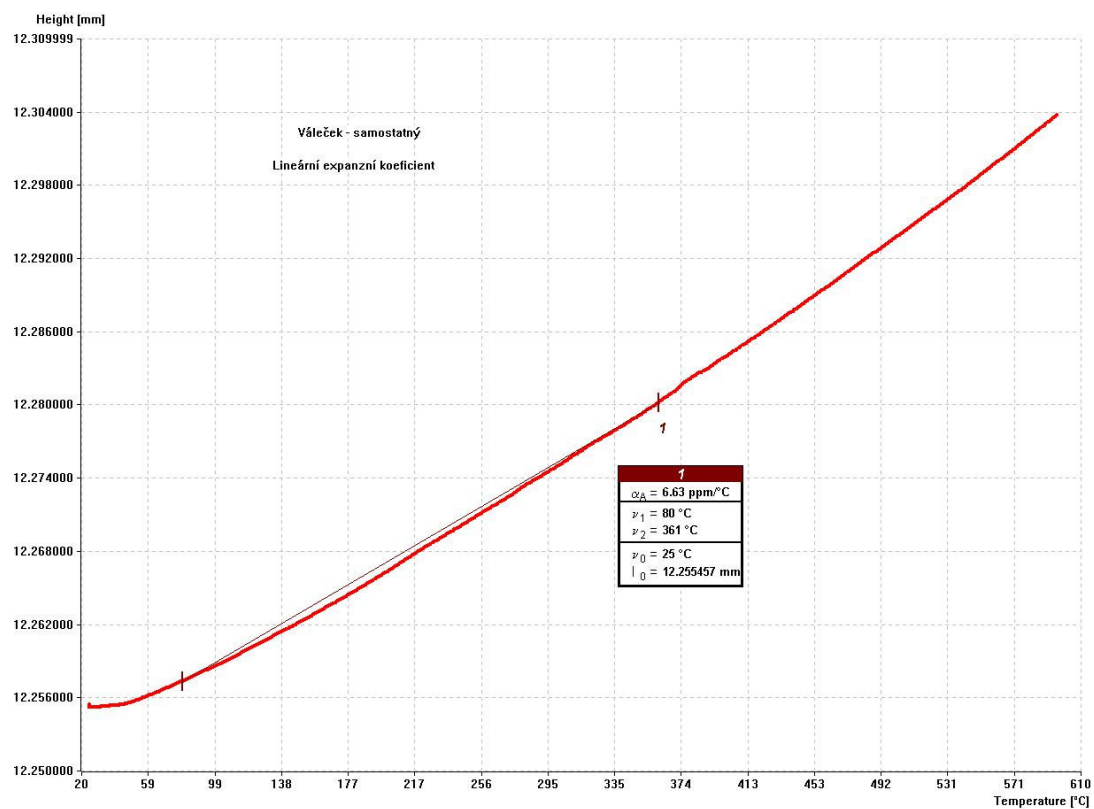
Graf. 54 Lineární expanzní koeficient z třetí křivky chlazení – pyrolýza 900°C vzpěr



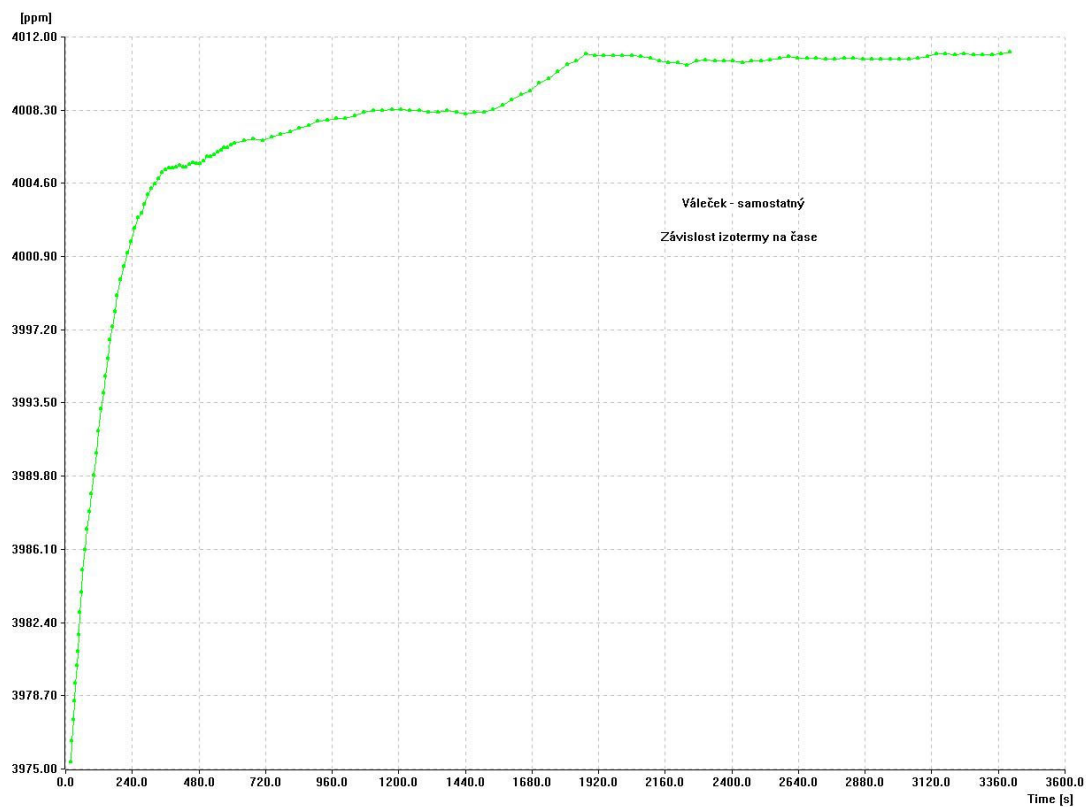
Graf. 55 Dilatační křivky - samotný váleček



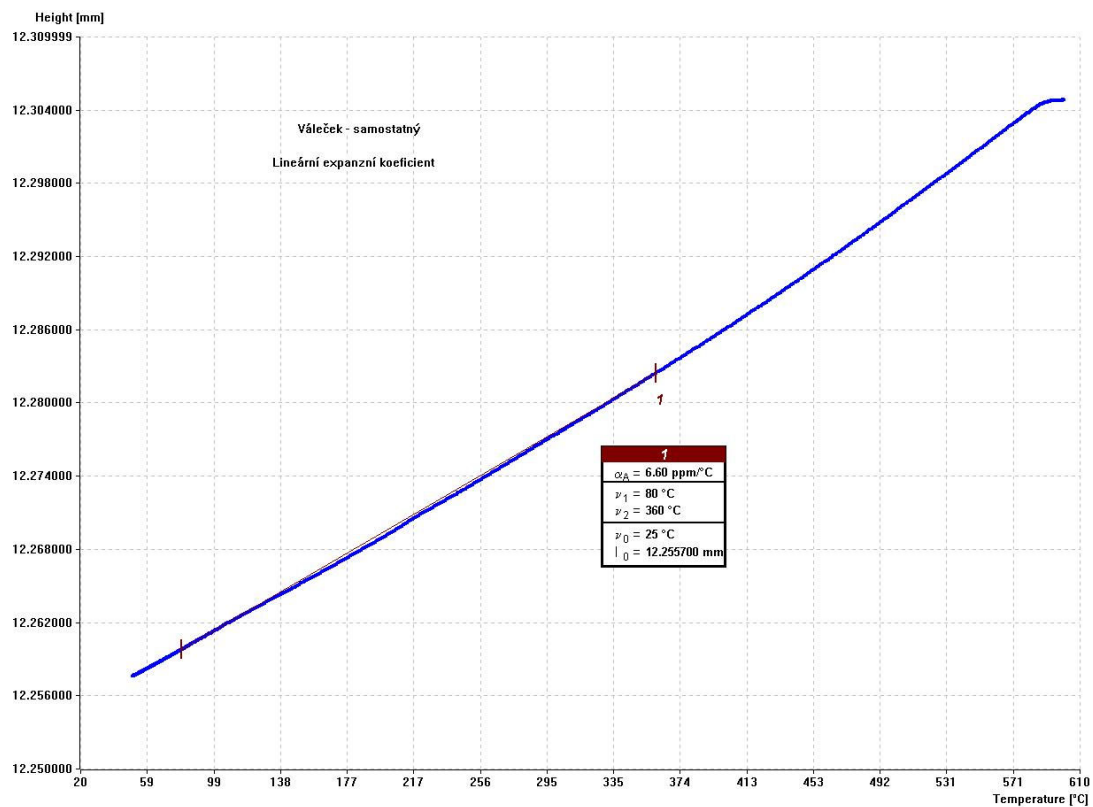
Graf. 56 Lineární expanzní koeficient z první křivky ohřevu – samotný váleček



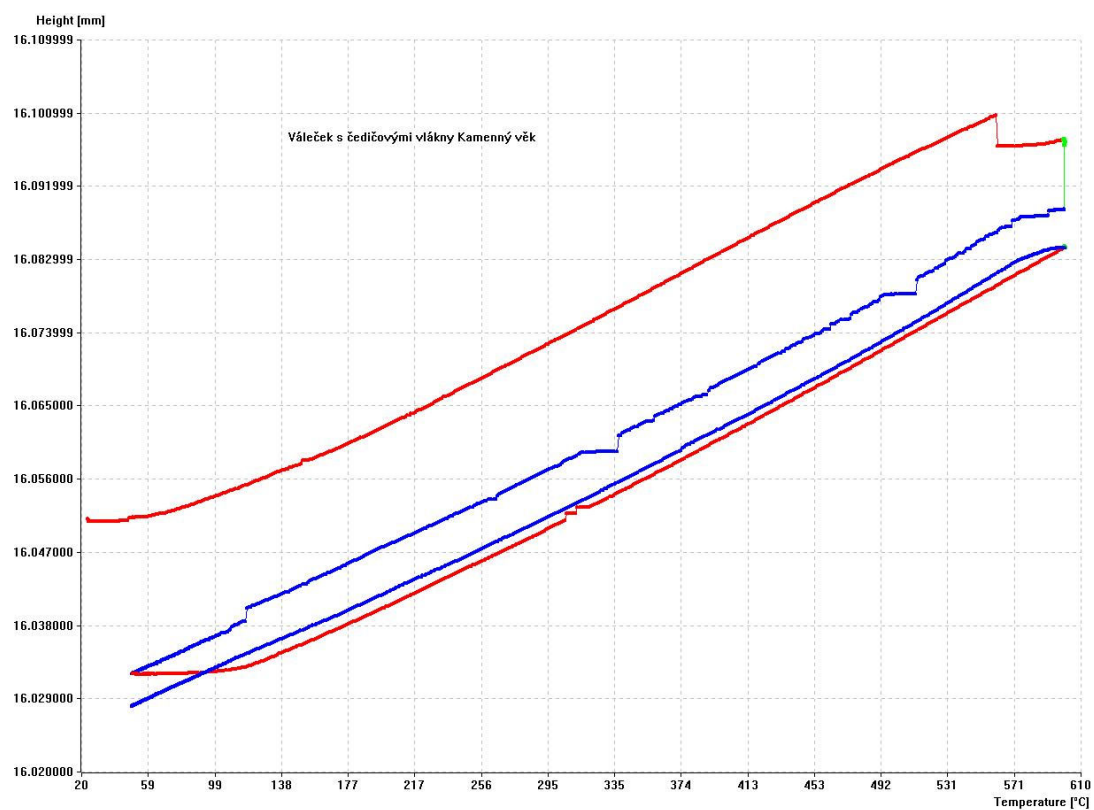
Graf. 57 Závislost izotermny na čase (časová prodleva) – samotný váleček



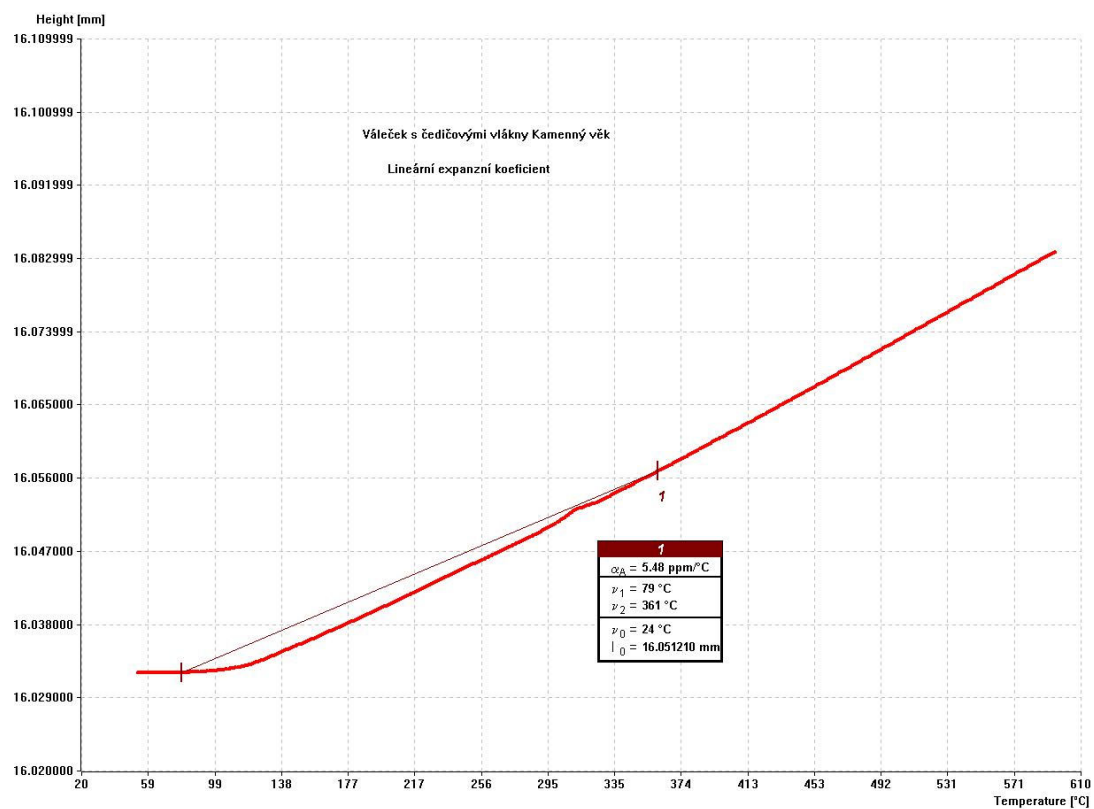
Graf. 58 Lineární expanzní koeficient z třetí křivky chlazení – samotný váleček



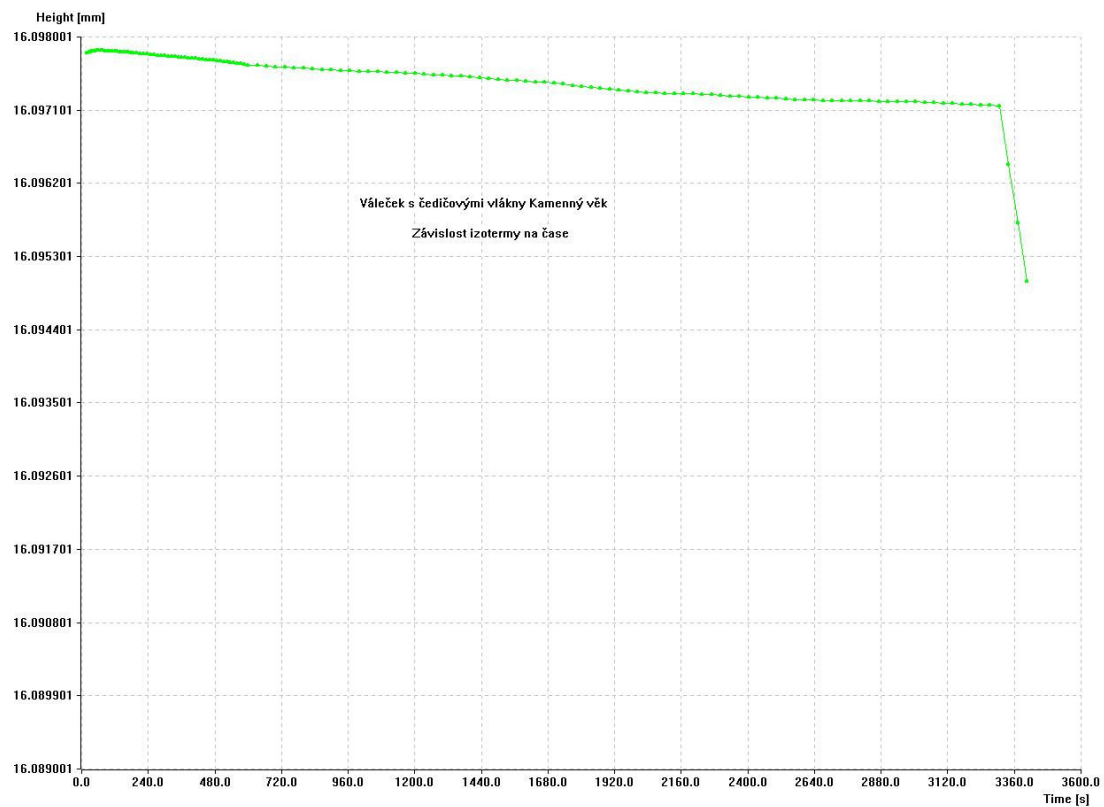
Graf. 59 Dilatační křivky - váleček s vlákny Kamenný věk



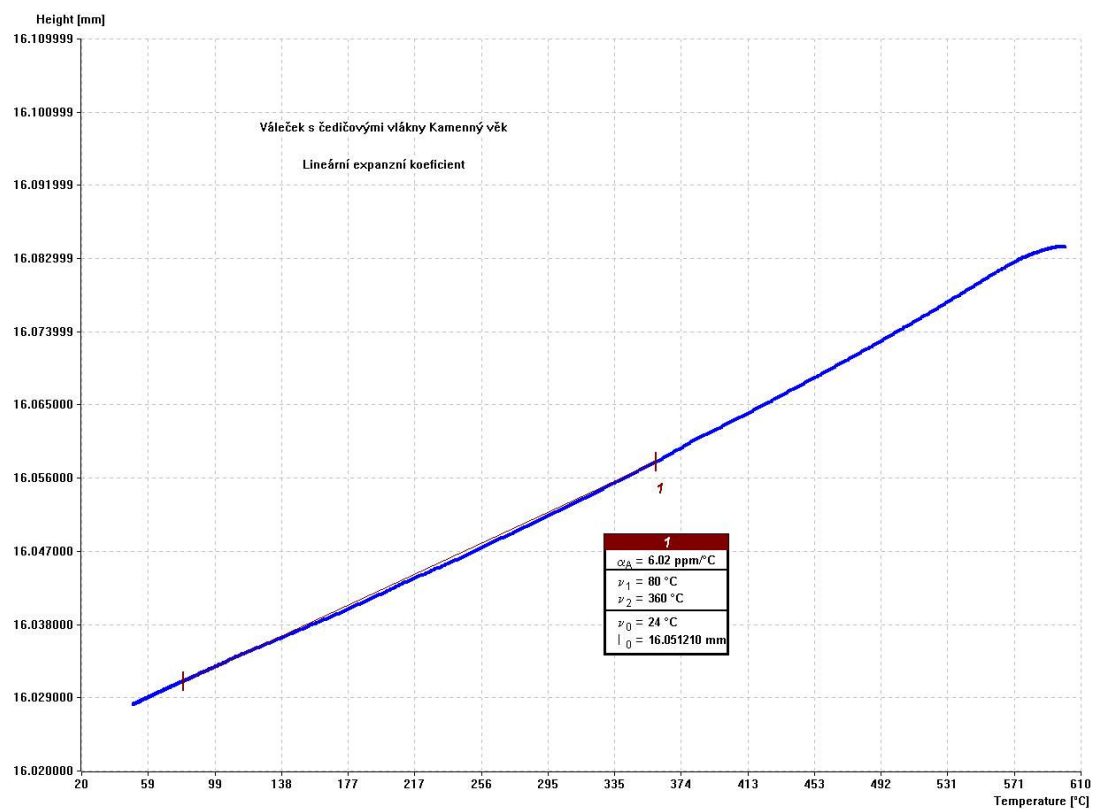
Graf. 60 Lineární expanzní koeficient z čtvrté křivky ohřevu – váleček v vlákny KV



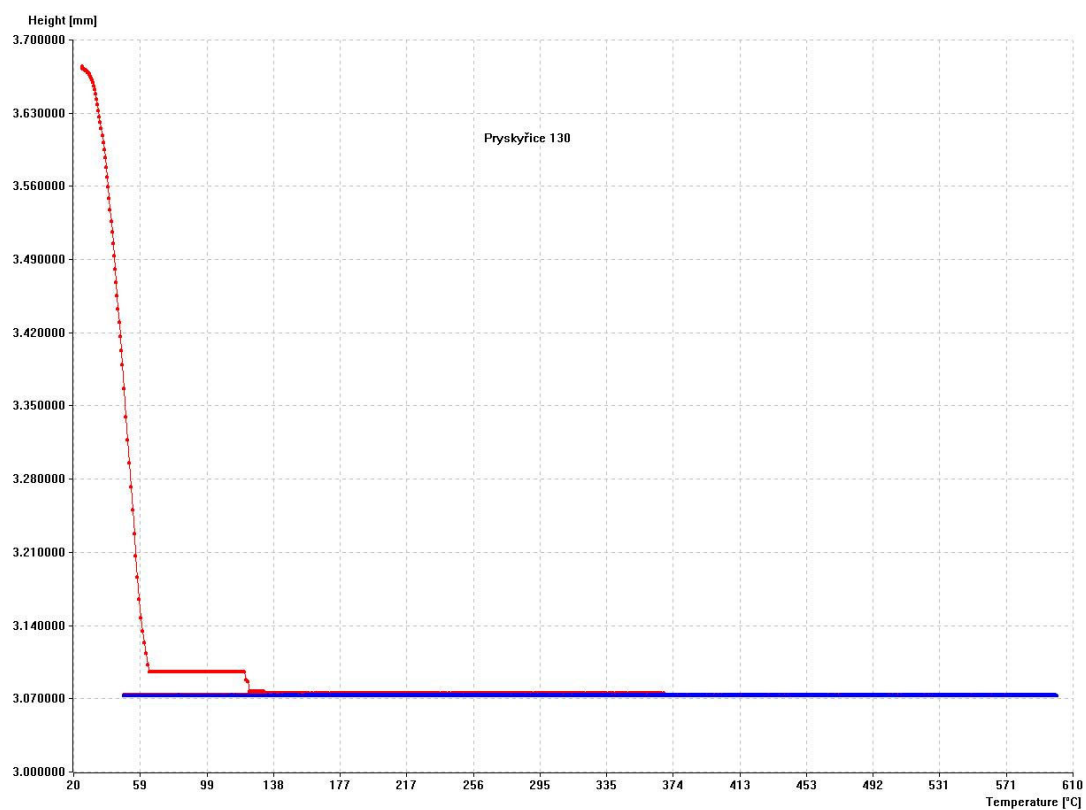
Graf. 61 Závislost izotermny na čase (časová prodleva) – váleček s vlákny KV



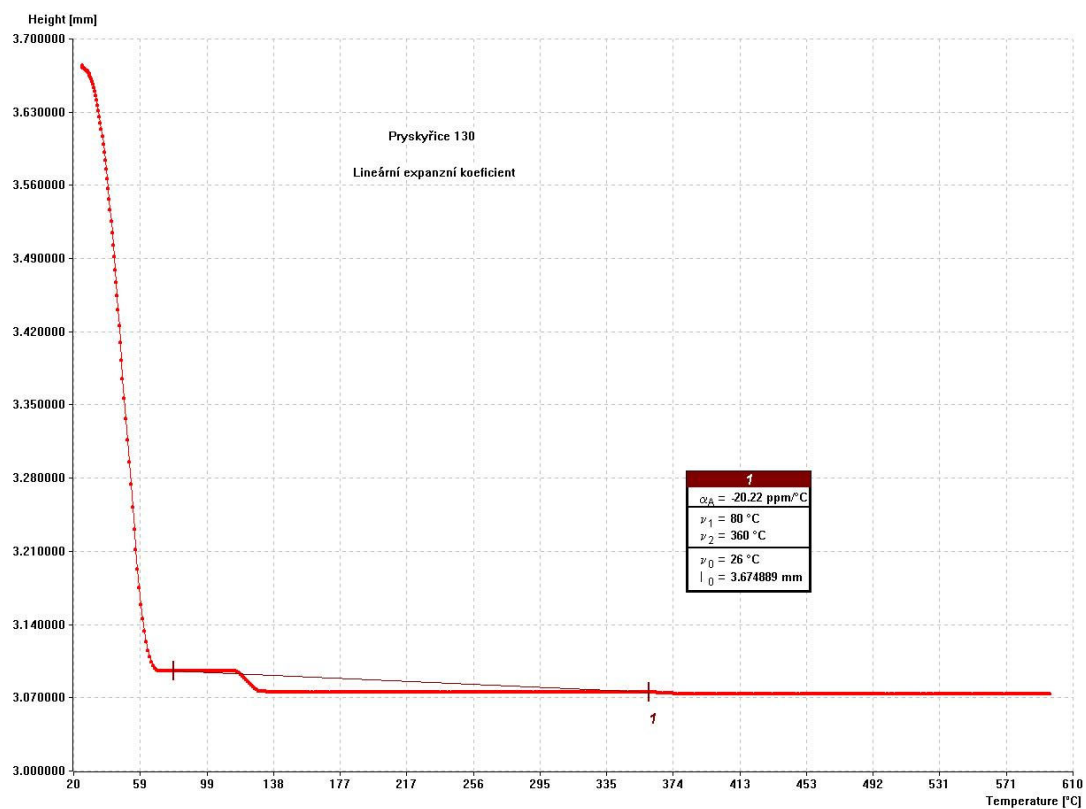
Graf. 62 Lineární expanzní koeficient z šesté křivky chlazení – váleček s vlákny KV



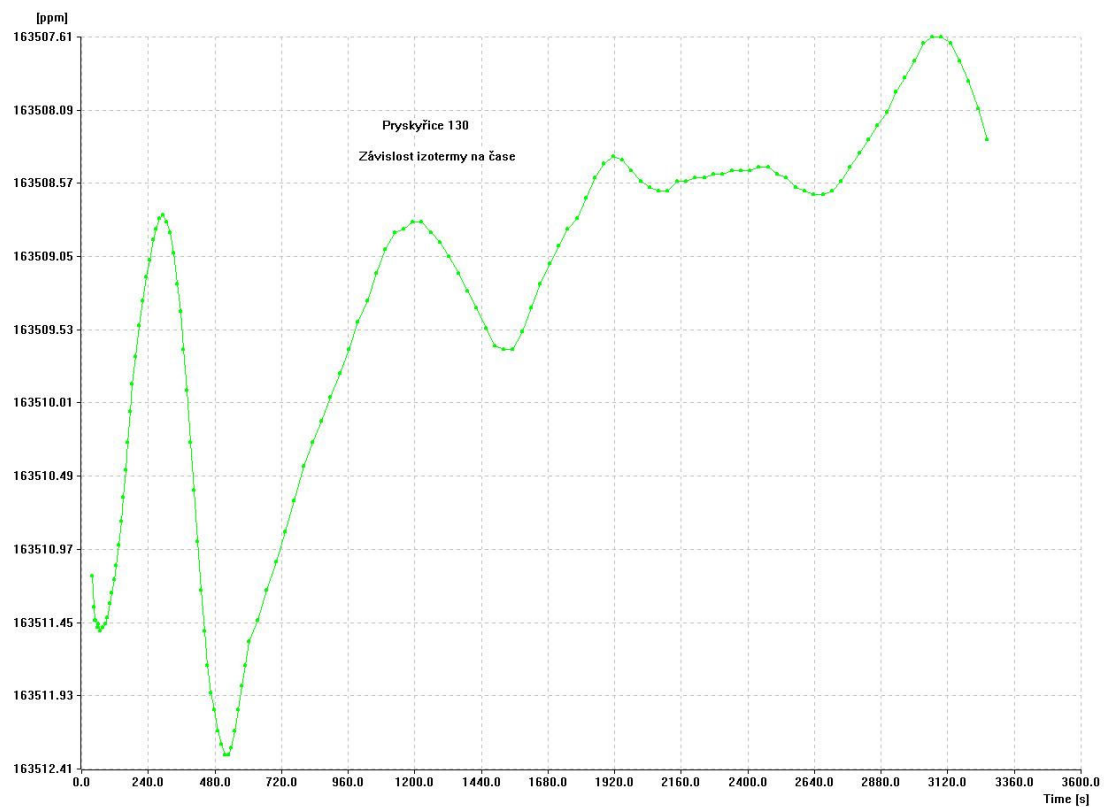
Graf. 63 Dilatační křivky – pryskyřice Lukosil M130



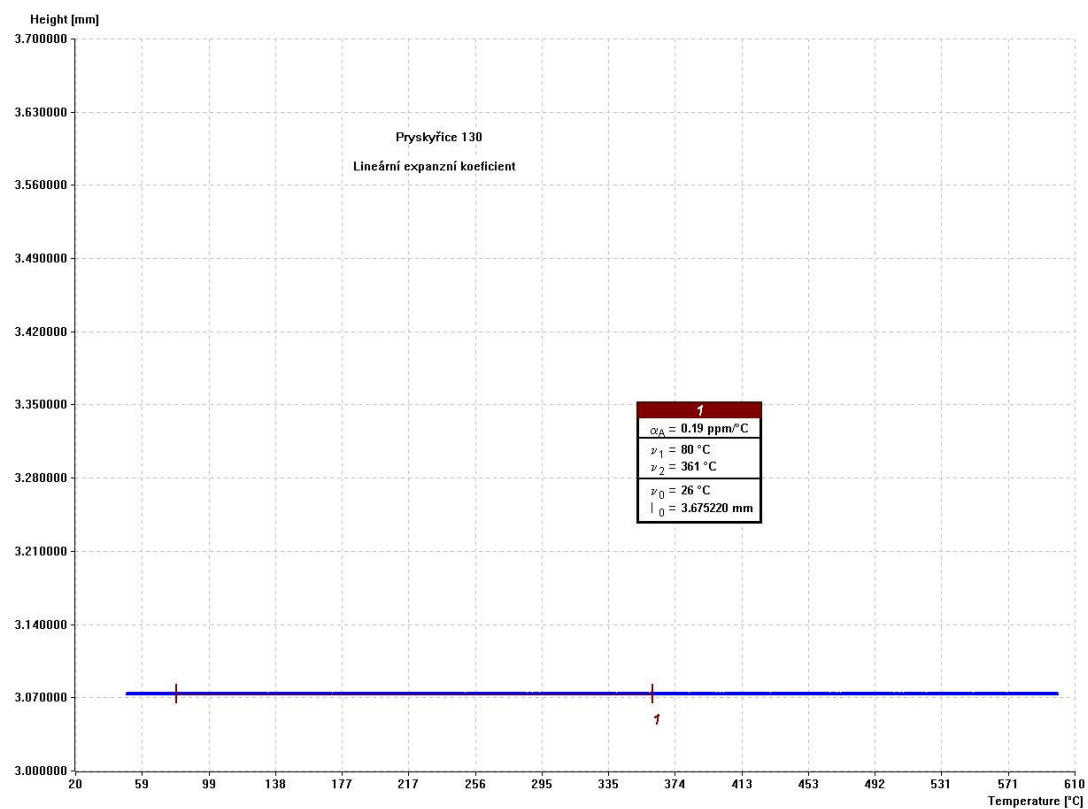
Graf. 64 Lineární expanzní koeficient z první křivky ohřevu – pryskyřice Lukosil M130



Graf. 65 Závislost izotermy na čase (časová prodleva) – pryskyřice Lukosil M130



Graf. 66 Lineární expanzní koeficient z třetí křivky chlazení – prskyřice Lukosil M130



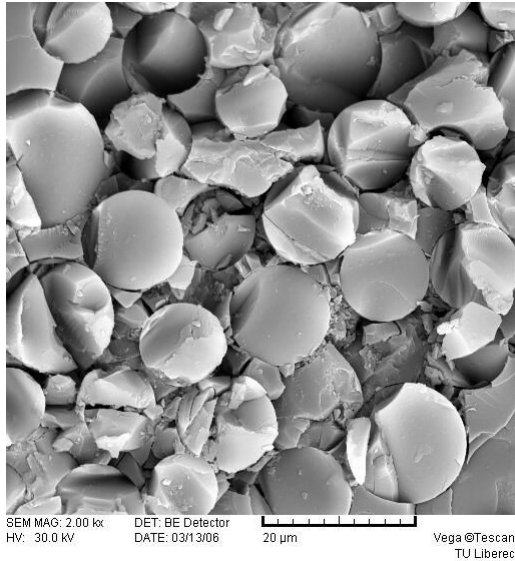
Příloha 8

Měření na elektronovém rastrovacím mikroskopu

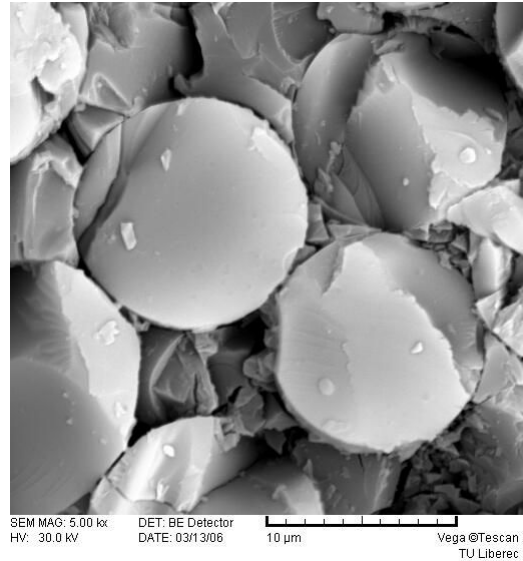
Příčné pohledy na kompozit s čedičovou výztuží před TMA

Polymer Sudaglas

zvětšení 2000x

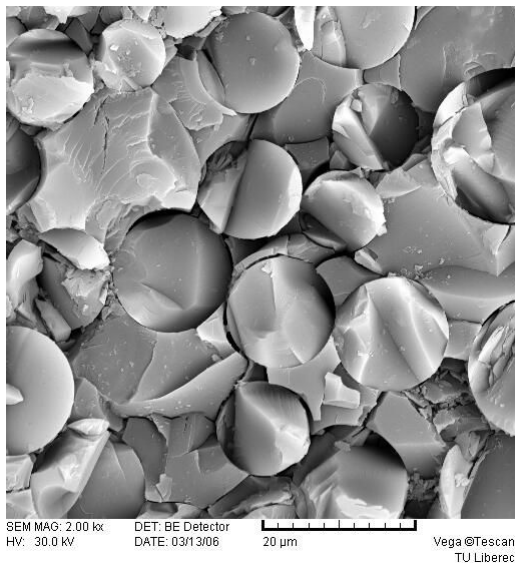


zvětšení 5000x

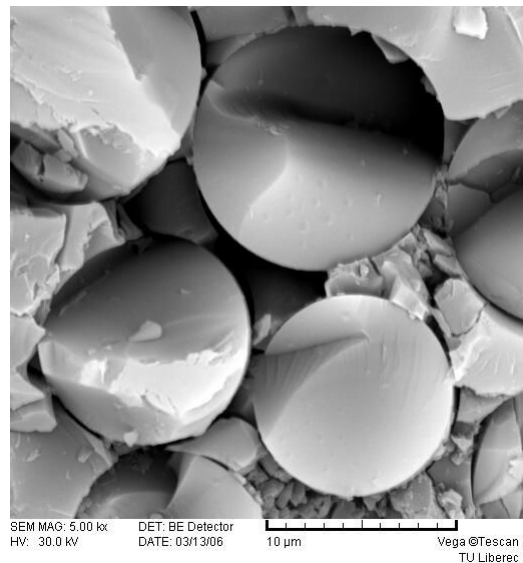


Pyrolýza 600°C

zvětšení 2000x

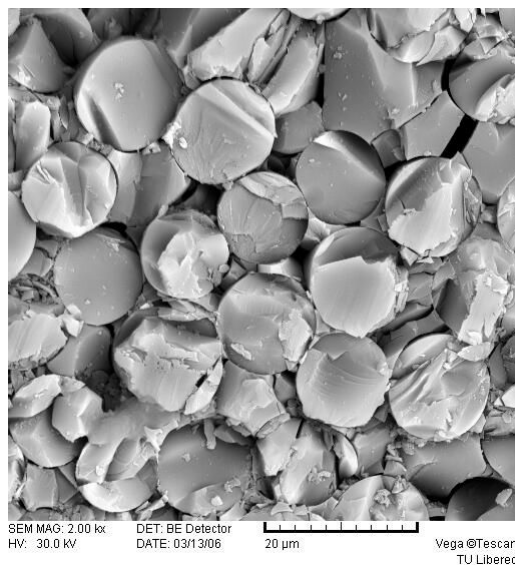
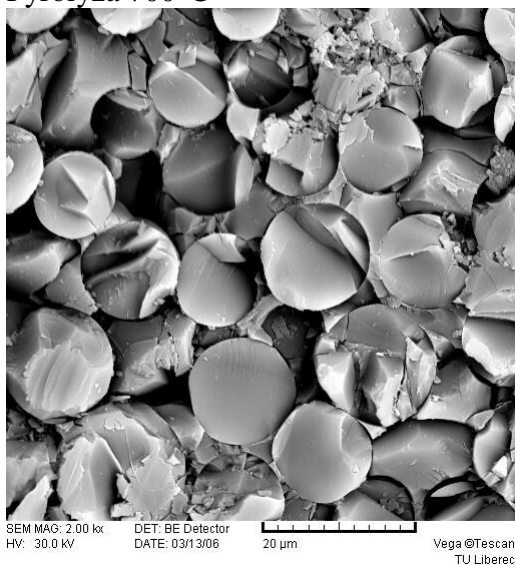


zvětšení 5000x

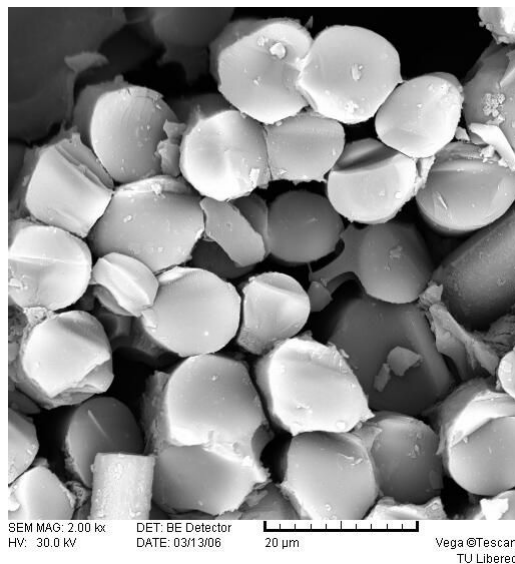
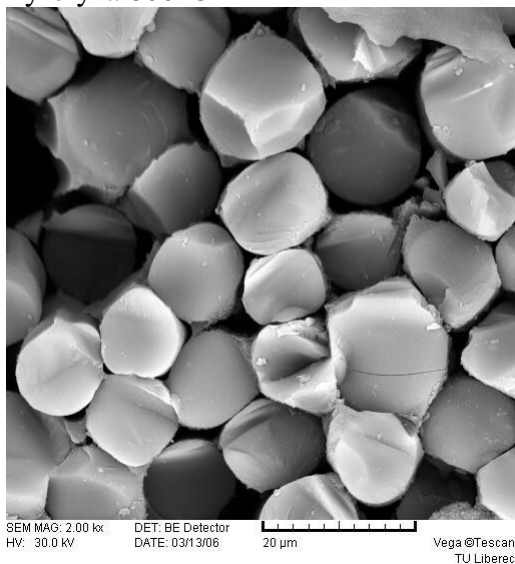


Příčné pohledy na kompozit s čedičovou výztuží před TMA zvětšení 2000x

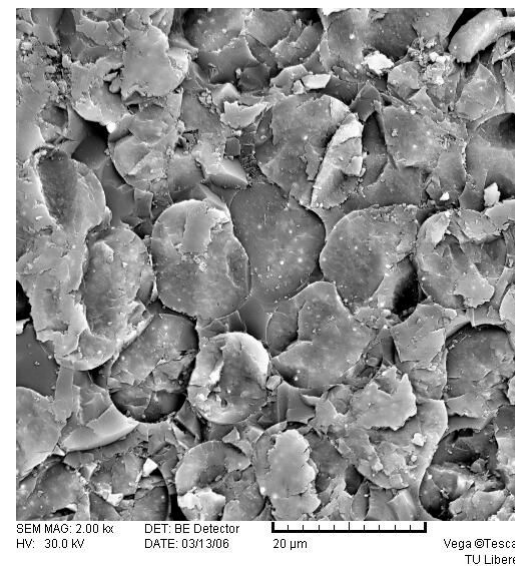
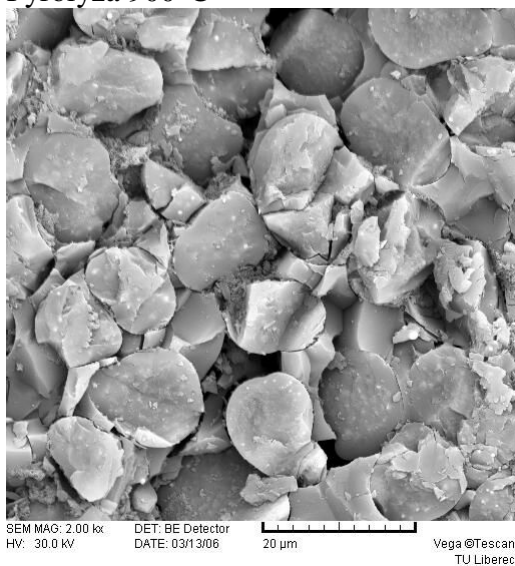
Pyrolýza 700°C



Pyrolýza 800°C

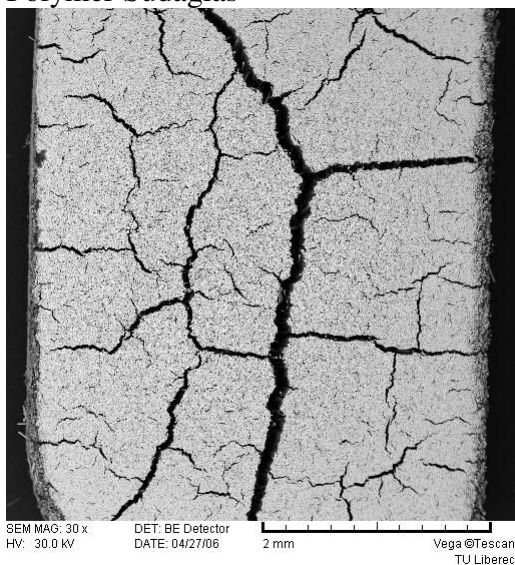


Pyrolýza 900°C

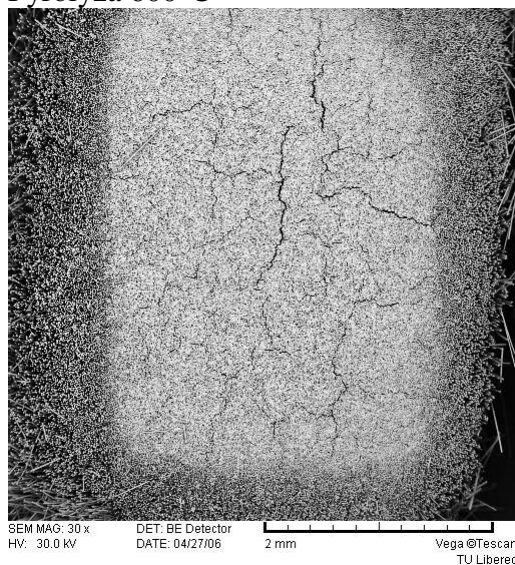


Příčné pohledy na kompozit s čedičovou výztuží po TMA zvětšení 30x

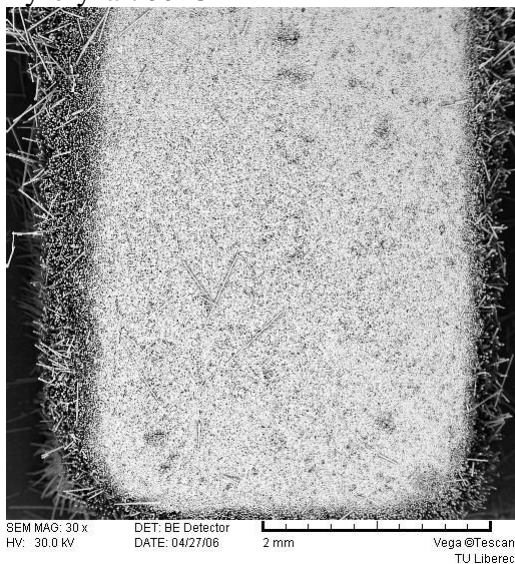
Polymer Sudaglas



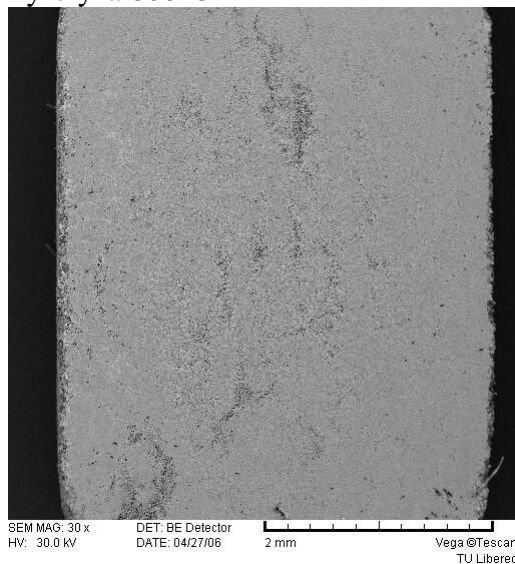
Pyrolýza 600°C



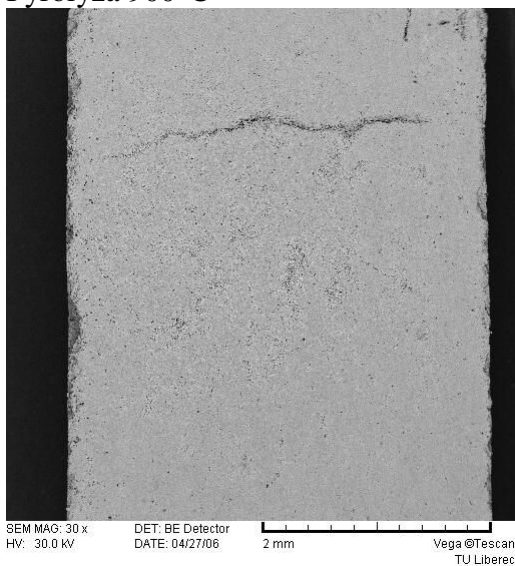
Pyrolýza 700°C



Pyrolýza 800°C

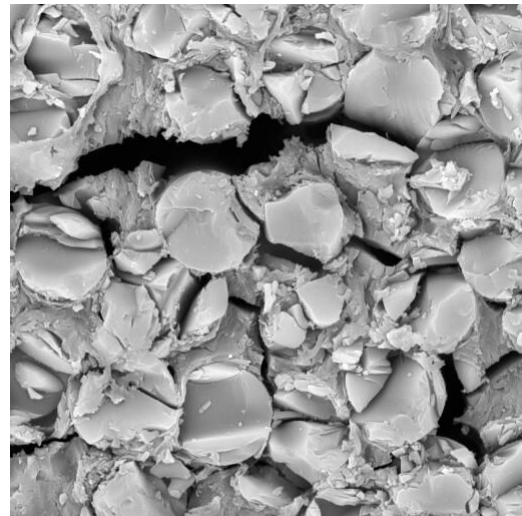
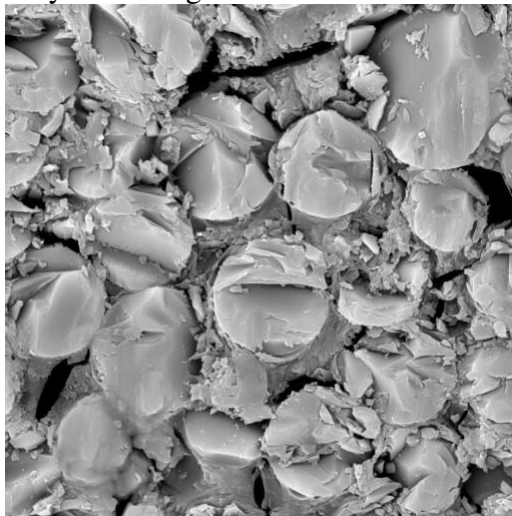


Pyrolýza 900°C

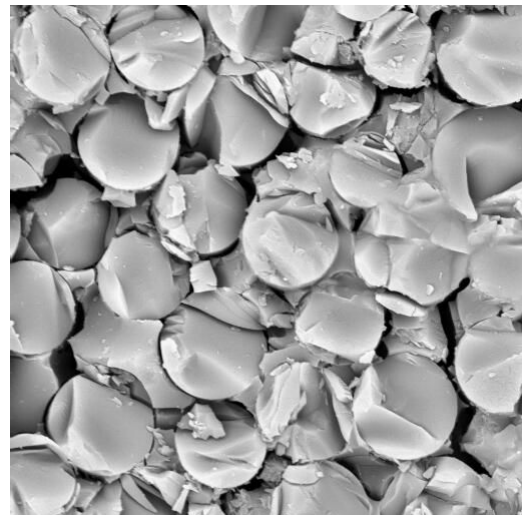
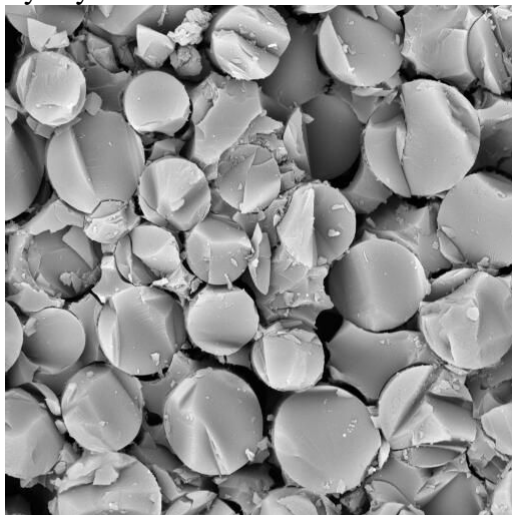


Příčné pohledy na kompozit s čedičovou výztuží po TMA zvětšení 2000x

Polymer Sudaglas



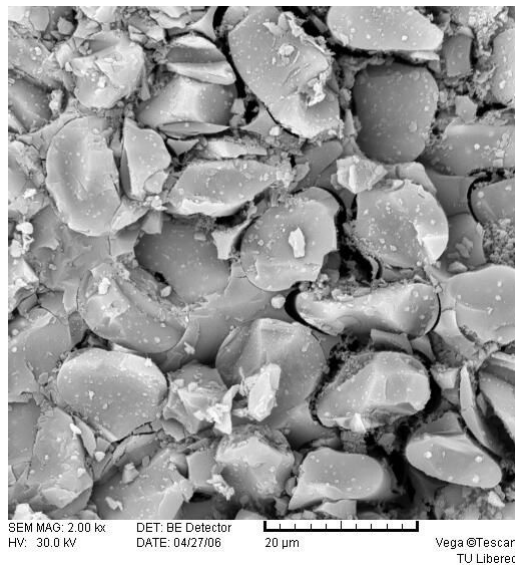
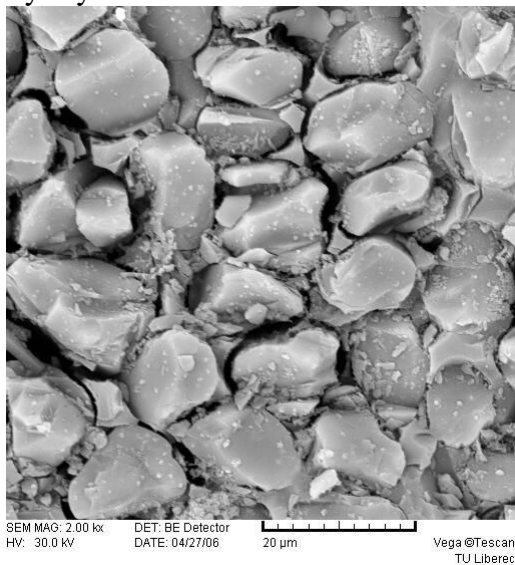
Pyrolýza 600°C



Pyrolýza 700°C



Pyrolýza 800°C



Pyrolýza 900°C

